

**FABRIKASI LEMBAR TIPIS BERBASIS
PLA/PEG/MWCNT/ZnO SEBAGAI FOTOKATALIS
MATERIAL UNTUK DEGRADASI ZAT WARNA
*BRILLIANT GREEN***

SKRIPSI

**Diajukan untuk Memenuhi Sebagian Syarat Guna
Memperoleh Gelar Sarjana Sains dalam Ilmu Fisika**



TASYA SALSABILA AZIZAH

NIM: 2108026035

**PROGRAM STUDI FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI WALISONGO
SEMARANG
2025**

**FABRIKASI LEMBAR TIPIS BERBASIS
PLA/PEG/MWCNT/ZnO SEBAGAI FOTOKATALIS
MATERIAL UNTUK DEGRADASI ZAT WARNA
*BRILLIANT GREEN***

SKRIPSI

**Diajukan untuk Memenuhi Sebagian Syarat Guna
Memperoleh Gelar Sarjana Sains dalam Ilmu Fisika**

TASYA SALSABILA AZIZAH

NIM: 2108026035

**PROGRAM STUDI FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI WALISONGO
SEMARANG**

2025

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Tasya Salsabila Azizah

NIM : 2108026035

Jurusan : Fisika

Menyatakan bahwa skripsi yang berjudul:

**FABRIKASI LEMBAR TIPIS BERBASIS
PLA/PEG/MWCNT/ZnO SEBAGAI FOTOKATALIS
MATERIAL UNTUK DEGRADASI ZAT WARNA *BRILLIANT
GREEN***

Secara keseluruhan adalah hasil penelitian/karya saya sendiri, kecuali bagian tertentu yang dirujuk sumbernya.

Semarang, 24 Juni 2025
Pembuat Pernyataan,



Tasya Salsabila Azizah
NIM. 2108026035



KEMENTERIAN AGAMA
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI WALISONGO
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
Jl. Prof. Dr. Hamka Ngaliyan Semarang
Telp. 024-7601295 Fax. 7615387

PENGESAHAN

Naskah skripsi berikut ini:

Judul : "Fabrikasi Lembar Tipis Berbasis
PLA/PEG/MWCNT/ZnO Sebagai Fotokatalis
Material Untuk Degradasi Zat Warna *Brilliant
Green*"

Penulis : Tasya Salsabila Azizah
NIM : 2108026035

Telah diujikan dalam sidang tugas akhir oleh Dewan Penguji Fakultas
Sains dan Teknologi UIN Walisongo Semarang dan dapat diterima
sebagai salah satu syarat memperoleh gelar sarjana dalam Ilmu Fisika.

Semarang, 03 Juli 2025

DEWAN PENGUJI

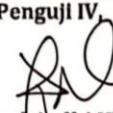
Penguji I,

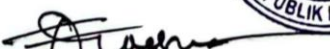
Penguji II,


Dr. Hamdan Hadi Kusuma, M.Sc
NIP. 197703202009121002
Penguji III,


Hartono, M.Sc
NIP. 199009242019031006
Penguji IV,


Irman Said Prasetyo, M.Sc
NIP. 199112282019031009
Pembimbing I,


Muhammad Ardhi Khalif, M.Sc
NIP. 198210092011011010
Pembimbing II,


Dr. Hamdan Hadi Kusuma, M.Sc
NIP. 197703202009121002
Pembimbing III,


Sheilla Rully Anggita, M.Si
NIP. 199005052019032017



TT ELEKTRONIK

Yosephin Dewiani Rahmayanti, S.Si., M.Sc., Ph.D
NIP. 198901212014012001



Dokumen ini ditandatangani
secara elektronik menggunakan
sertifikat dari BSrE, silakan
lakukan verifikasi pada dokumen
elektronik yang dapat diunduh
dengan melakukan scan QR Code

NOTA DINAS

Semarang, 24 Juni 2025

Yth. Ketua Program Studi Fisika
Fakultas Sains dan Teknologi
UIN Walisongo Semarang

Assalamu'alaikum warahmatullahi wabarakatuh

Dengan ini diberitahukan bahwa saya telah melakukan bimbingan, arahan, dan koreksi naskah skripsi dengan:

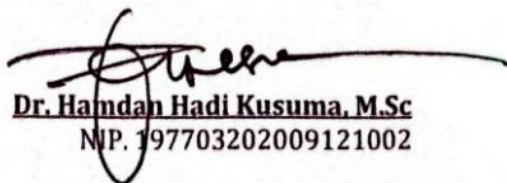
Judul : FABRIKASI LEMBAR TIPIS BERBASIS
PLA/PEG/MWCNT/ZnO SEBAGAI
FOTOKATALIS MATERIAL UNTUK
DEGRADASI ZAT WARNA *BRILLIANT
GREEN*

Nama : Tasya Salsabila Azizah
NIM : 2108026035
Jurusan : Fisika

Saya memandang bahwa naskah skripsi tersebut sudah dapat diajukan kepada Fakultas Sains dan Teknologi UIN Walisongo untuk diajukan dalam Sidang Munaqosah.

Wassalamu'alaikum warahmatullahi wabarakatuh

Pembimbing I,



Dr. Hamdan Hadi Kusuma, M.Sc
NIP. 197703202009121002

NOTA DINAS

Semarang, 24 Juni 2025

Yth. Ketua Program Studi Fisika
Fakultas Sains dan Teknologi
UIN Walisongo Semarang

Assalamu'alaikum warahmatullahi wabarakatuh

Dengan ini diberitahukan bahwa saya telah melakukan bimbingan, arahan, dan koreksi naskah skripsi dengan:

Judul : FABRIKASI LEMBAR TIPIS BERBASIS
PLA/PEG/MWCNT/ZnO SEBAGAI
FOTOKATALIS MATERIAL UNTUK
DEGRADASI ZAT WARNA *BRILLIANT
GREEN*

Nama : Tasya Salsabila Azizah
NIM : 2108026035
Jurusan : Fisika

Saya memandang bahwa naskah skripsi tersebut sudah dapat diajukan kepada Fakultas Sains dan Teknologi UIN Walisongo untuk diajukan dalam Sidang Munaqosah.

Wassalamu'alaikum warahmatullahi wabarakatuh

Pembimbing II,



Sheilla Rully Anggita, M.Si
NIP. 199005052019032017

NOTA DINAS

Semarang, 24 Juni 2025

Yth. Ketua Program Studi Fisika
Fakultas Sains dan Teknologi
UIN Walisongo Semarang

Assalamu'alaikum warahmatullahi wabarakatuh
Dengan ini diberitahukan bahwa saya telah melakukan
bimbingan, arahan, dan koreksi naskah skripsi dengan:

Judul : FABRIKASI LEMBAR TIPIS BERBASIS
PLA/PEG/MWCNT/ZnO SEBAGAI
FOTOKATALIS MATERIAL UNTUK
DEGRADASI ZAT WARNA *BRILLIANT*
GREEN
Nama : Tasya Salsabila Azizah
NIM : 2108026035
Jurusan : Fisika

Saya memandang bahwa naskah skripsi tersebut sudah
dapat diajukan kepada Fakultas Sains dan Teknologi UIN
Walisongo untuk diajukan dalam Sidang Munaqosah.
Wassalamu'alaikum warahmatullahi wabarakatuh

Pembimbing III,



TT ELEKTRONIK

Yosephin Dewiani Rahmayanti, S.Si., M.Sc., Ph.D

NIP. 198901212014012001



Dokumen ini ditandatangani
secara elektronik menggunakan
sertifikat dari BSR-E, silahkan
lakukan verifikasi pada dokumen
elektronik yang dapat diunduh
dengan melakukan scan QR Code

ABSTRAK

Pencemaran limbah tekstil yang mengandung zat warna sintetik memerlukan penanganan efektif, salah satunya melalui metode fotokatalisis. Penelitian ini bertujuan untuk memfabrikasi dan mengkarakterisasi lembar tipis berbasis PLA/PEG/MWCNT/ZnO serta menguji kinerjanya sebagai fotokatalis untuk degradasi zat warna *brilliant green* (BG). Fabrikasi lembar tipis dibuat dengan metode *solution casting*, kemudian dikarakterisasi menggunakan XRD, FTIR, dan uji sudut kontak, serta diuji aktivitas fotokatalitiknya di bawah sinar UV. Hasil karakterisasi XRD menunjukkan adanya puncak-puncak khas dari bahan penyusun, dengan penurunan intensitas akibat penambahan ZnO. Penambahan ZnO juga menurunkan kristalinitas material akibat aglomerasi partikel. Hasil karakterisasi FTIR menunjukkan adanya gugus-gugus fungsi khas dari masing-masing bahan penyusun, yang menunjukkan adanya interaksi antar komponen dalam membentuk struktur komposit. Uji sudut kontak menunjukkan bahwa penambahan MWCNT meningkatkan sifat hidrofobik, sedangkan penambahan PEG meningkatkan sifat hidrofilik, namun penambahan ZnO menurunkan sifat hidrofilik. Uji fotokatalis menunjukkan bahwa komposit PLA/PEG/MWCNT 1%/ZnO 5% memiliki konstanta laju reaksi tertinggi sebesar 0,00488 menit⁻¹. Hal ini menunjukkan efisiensi degradasi BG. Dengan demikian, komposit ini berpotensi digunakan sebagai material fotokatalis ramah lingkungan untuk pengolahan limbah cair.

Kata Kunci: PLA, PEG, MWCNT, ZnO, Fotokatalis, *brilliant green*

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat, hidayah serta inayahNya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Fabrikasi Lembar Tipis Berbasis PLA/PEG/MWCNT/ZnO sebagai Fotokatalis Material untuk Degradasi Zat Warna *Brilliant Green*”. Shalawat teriring salam semoga senantiasa tercurahkan kepada Nabi Muhammad SAW, dengan mengharapkan syafaat di hari kiamat nanti dan tergolong sebagai umatnya.

Skripsi ini disusun guna memenuhi tugas dan menjadi syarat untuk memperoleh gelar sarjana Fisika Fakultas Sains dan Teknologi UIN Walisongo Semarang. Dalam penyusunan skripsi ini, tidak lepas dari bantuan, bimbingan, motivasi, do’a dan saran-saran dari berbagai pihak. Oleh karena itu penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. Nizar, M.Ag selaku Rektor UIN Walisongo sekarang
2. Prof. Dr. H. Musahadi, M.Ag selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi
3. Ibu Alwiyah Nurhayati, M.Si., Ph.D. selaku Ketua Program Studi Fisika UIN Walisongo Semarang

4. Ibu Heni Sumarti, M.Si. selaku Wali dosen yang selalu mengarahkan dan membimbing saya dalam proses belajar.
5. Bapak Dr. Hamdan Hadi Kusuma, M.Sc, selaku dosen pembimbing yang telah meluangkan waktu, tenaga, dan pikiran serta sabar memberikan bimbingan dan pengarahan dalam penyusunan skripsi ini.
6. Ibu Sheilla Rully Anggita, M.Si selaku dosen pembimbing yang telah meluangkan waktu, tenaga, dan pikiran serta sabar memberikan bimbingan dan pengarahan dalam penyusunan skripsi ini.
7. Ibu Yosephin Dewiani Rahmayanti, S.Si., M.Sc., Ph.D selaku pembimbing dan peneliti di Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), yang telah memberikan izin kepada penulis untuk melakukan penelitian di Laboratorium Kimia, Pusat Riset Nanoteknologi BRIN, serta telah meluangkan waktu, tenaga, dan pikiran serta dengan penuh kesabaran memberikan bimbingan dan arahan kepada penulis dalam pelaksanaan penelitian dan penulisan skripsi ini.
8. Ibu Murni Handayani, Ph.D selaku Kepala Pusat Riset Nanoteknologi BRIN yang telah memberikan izin untuk melakukan penelitian di Pusat Riset

Nanoteknologi serta memberikan bimbingan kepada penulis dalam penyusunan skripsi ini.

9. Segenap Peneliti di Pusat Riset Nanoteknologi BRIN yang telah memberikan bantuan serta ilmu pengetahuan kepada penulis selama pelaksanaan penelitian di BRIN.
10. Segenap Dosen dan staff FST terkhusus bapak/ibu Dosen program studi Fisika UIN Walisongo, yang telah memberikan banyak ilmu selama masa perkuliahan.
11. Kedua orang tua penulis yang telah mendidik dan membesarkan penulis dengan penuh kasih sayang, ketulusan, keikhlasan dan senantiasa memberikan semangat, materi dan doa sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
12. Teman-teman laboratorium Ukhti Lutfia, Gafira Laily, mas Daffa Viandika, mas Yoga Pranata, mba Syadza Aisyah, mas Fariz irkham, dan mas Aulia Anggoro yang telah memberikan bantuan, arahan, bimbingan, ilmu pengetahuan, dan semangat kepada penulis.
13. Semua teman-teman Fisika 2021 terkhusus peminatan Fisika Material, selalu memberikan dukungan, semangat kepada penulis.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih banyak kekurangannya dan jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, penulis menerima kritik maupun saran yang membangun demi penyusunan karya yang lebih baik. Akhir kata penulis berharap semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi penulis khususnya dan bagi pembaca pada umumnya.

Semarang, Juni 2025

Penulis,

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Tasya' followed by a stylized surname.

Tasya Salsabila Azizah

NIM. 2108026035

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
PERNYATAAN KEASLIAN	ii
PENGESAHAN.....	iii
NOTA DINAS.....	iv
ABSTRAK.....	vii
KATA PENGANTAR.....	viii
DAFTAR ISI	xii
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR GAMBAR.....	xvi
DAFTAR LAMPIRAN.....	xviii
BAB I PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang.....	1
B. Rumusan Masalah	12
C. Tujuan Penelitian.....	12
D. Batasan Masalah	13
E. Manfaat Penelitian	13
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	14
A. Landasan Teori.....	14
1. Komposit	14
2. <i>Polylactic Acid (PLA)</i>	17

3.	<i>Polyethylene glycol (PEG)</i>	19
4.	<i>Multi Wall Carbon Nanotube (MWCNT)</i>	21
5.	Seng Oksida (ZnO)	24
6.	<i>Brilliant Green (BG)</i>	28
7.	Fotokatalisis	30
8.	Karakterisasi	33
B.	Kajian Pustaka	42
C.	Kerangka Berpikir	46
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		47
A.	Tempat dan Waktu Penelitian	47
B.	Alat dan Bahan	47
C.	Prosedur Penelitian	48
1.	Pembuatan Ekstrak Daun Kelor	49
2.	Sintesis Seng Oksida (ZnO)	49
3.	Fabrikasi Lembar Tipis PLA/PEG/MWCNT/ZnO 50	
4.	Karakterisasi	52
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		59
A.	Fabrikasi Lembar Tipis	59
B.	Karakterisasi XRD (<i>X-Ray Diffraction</i>) Lembaran Tipis	64
C.	Karakterisasi FTIR (<i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i>)	75
D.	Uji Sudut Kontak (<i>Contact angle</i>)	78
E.	Fotokatalisis	81

BAB V PENUTUP.....	102
A. Kesimpulan	102
B. Saran	104
DAFTAR PUSTAKA	106
LAMPIRAN.....	148
DAFTAR RIWAYAT HIDUP.....	174

DAFTAR TABEL

Tabel	Judul	Halaman
Tabel 3.1	Variasi Komposisi MWCNT-COOH, ZnO, PLA, dan PEG dalam %wt	52
Tabel 4.1	Hasil Perhitungan Rata-rata dari Setiap Sampel Lembar Tipis	68
Tabel 4.2	Hasil Pengukuran Uji Sudut Kontak Lembar Tipis	75
Tabel 4.3	Nilai Konstanta Laju Reaksi dan Nilai Regresi dari Masing-Masing Sampel	93
Tabel 4.4	Nilai Konstanta Laju Adsorpsi dan Nilai Regresi dari Masing-Masing Sampel	99
Tabel 4.5	Nilai Konstanta Laju Adsorpsi dan Nilai Regresi dari Masing-Masing Sampel	101

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Struktur kimia PLA	19
Gambar 2.2	SWCNT dan MWCNT	24
Gambar 2.3	Struktur Kristal ZnO	28
Gambar 2.4	Struktur molekul kimia brilliant green	30
Gambar 2.5	Difraksi Sinar-X	35
Gambar 2.6	Skema Prinsip Kerja FTIR	39
Gambar 2.7	Skema Prinsip Kerja Spektrofotometer UV-Vis	42
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian	48
Gambar 4.1	Hasil Fabrikasi dari Lembar Tipis	60
Gambar 4.2	Pola XRD dari Lembar Tipis Tanpa Penambahan ZnO	67
Gambar 4.3	Pola XRD dari Lembar Tipis dengan Penambahan ZnO	73
Gambar 4.4	Spektrum FTIR dari ZnO dan Lembar Tipis	78
Gambar 4.5	Gambar Uji Sudut Kontak Lembar Tipis (a) PLA/MWCNT 1%, (b) PLA/PEG, (c) PLA/PEG/MWCNT 1%, (d) PLA/PEG/MWCNT	81

	2,5%/ZnO 2,5%, (e) PLA/PEG/MWCNT 1%/ZnO 5%	
Gambar 4.6	Kurva Standar Larutan BG	82
Gambar 4.7	Kurva Fotolisis Larutan BG	84
Gambar 4.8	Persentase Efisiensi Degradasi MB Menggunakan Berbagai Variasi Lembar Tipis sebagai Fotokatalis	88
Gambar 4.9	Persentase Efisiensi Degradasi BG menggunakan 2 Lembar Katalis	90
Gambar 4.10	Persentase Efisiensi Degradasi BG pada variasi pH Larutan	92
Gambar 4.11	Kurva Kinetika Reaksi Pseudo- Orde Pertama	96
Gambar 4.12	Kurva Kinetika Adsorpsi Pseudo- Orde Pertama	99
Gambar 4.12	Kurva Kinetika Adsorpsi Pseudo- Orde Kedua	101

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Perbesaran Hasil Uji XRD.....	148
Lampiran 2 Perhitungan Nilai d (Å).....	149
Lampiran 3 Perhitungan Ukuran Kristal (D).....	154
Lampiran 4 Perhitungan Derajat Kristalinitas (X_c).....	159
Lampiran 5 Perhitungan Hasil Fotokatalisis	161

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Pencemaran lingkungan telah menjadi isu global yang mengkhawatirkan dalam beberapa dekade terakhir, terutama disebabkan oleh aktivitas industri yang menghasilkan limbah dalam jumlah besar dan berdampak serius terhadap kerusakan lingkungan (Ramadhani et al., 2024). Industri diketahui menjadi sumber utama berbagai jenis polutan, yang menyebabkan polusi air dan polusi udara, yang berdampak pada munculnya berbagai permasalahan lingkungan dan kesehatan. Salah satu polutan berbahaya yang sering dihasilkan oleh industri, khususnya industri tekstil adalah zat warna yang mencemari perairan. Kehadiran zat warna dalam air dapat menghambat masuknya sinar matahari, sehingga mengganggu fotosintesis organisme air. Selain itu, zat warna cenderung membentuk senyawa kompleks dengan logam berat yang bersifat toksik bagi organisme air, serta bersifat karsinogenik dan beracun bagi manusia (Isai & Shrivastava, 2019). Jika pencemaran ini terus berlangsung, ketersediaan air bersih akan semakin terancam. Menurut survei terbaru, sekitar 65% populasi berpotensi terdampak

oleh kekurangan air bersih pada tahun 2050 (Ashokkumar et al., 2023).

Salah satu penyebab sulitnya penanganan limbah tekstil adalah penggunaan pewarna sintesis yang dikenal sulit terurai karena struktur molekulnya yang kompleks. Pewarna ini tidak hanya menurunkan kadar oksigen terlarut yang dibutuhkan organisme air untuk bernafas, tetapi juga mengandung zat beracun yang berbahaya bagi Kesehatan manusia (Mojiri et al., 2023). Berdasarkan struktur kimianya, pewarna tekstil dapat dikelompokkan menjadi berbagai jenis, seperti azo, triphenylmethane, dan anthraquinone. Salah satu contohnya adalah pewarna triphenylmethane, yaitu *brilliant green* (BG) yang banyak digunakan dalam industri tekstil, kertas, serta aplikasi medis dan biologis. BG bersifat larut dalam air, beracun dan dapat menyebabkan gangguan Kesehatan pada manusia dan hewan seperti, iritasi mata dan iritasi kulit (El Messaoudi et al., 2024). Selaras dengan permasalahan tersebut, Al- Qur'an memberikan perhatian khusus terhadap pentingnya menjaga kelestarian alam. Dalam surat Ar-Rum ayat 41 yang berbunyi:

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

Artinya: "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 (ke jalan yang benar)."

Menurut Quraish Shihab, kata "fasad" yang digunakan dalam ayat tersebut mengacu pada berbagai bentuk kerusakan lingkungan yang terjadi saat ini merupakan konsekuensi dari perilaku manusia yang tidak bertanggung jawab (Akbar & Yusuf, 2024). Oleh karena itu, upaya untuk mengatasi pencemaran lingkungan tidak hanya menjadi tanggung jawab ilmiah, tetapi juga merupakan bagian dari nilai moral dan keagamaan.

Berbagai teknik pengolahan limbah telah banyak dikembangkan. Beberapa metode yang umum digunakan antara lain filtrasi membrane (Tesalonika & Manurung, 2025), adsorpsi (Andrade-Guel et al., 2022), presipitasi kimia (Raganata et al., 2020), pertukaran ion (Damajanti et al., 2021). Namun, metode-metode tersebut umumnya hanya memindahkan polutan dari satu bentuk ke bentuk lain

tanpa benar-benar menghancurkannya, sehingga masih berpotensi mencemari lingkungan apabila tidak ditangani lebih lanjut. Selain itu, metode tersebut juga memerlukan biaya operasional yang cukup tinggi. Metode lain yang telah dikembangkan seperti sonolisis (Jelani & Sanjaya, 2022), radiasi pengion (Nurmanjaya et al., 2018), ozonasi (Ayuningtyas, 2020), dan fotokatalis (Pinzari, 2024).

Salah satu metode yang sedang dikembangkan adalah fotokatalisis. Fotokatalisis merupakan proses reaksi fotokimia yang berlangsung dengan bantuan cahaya dan material katalis. Proses ini dimulai ketika katalis menyerap energi dari cahaya ultraviolet, yang menyebabkan eksitasi elektron dari pita valensi ke pita konduksi dan membentuk pasangan elektron-lubang. Pasangan tersebut kemudian memicu terbentuknya radikal bebas yang sangat reaktif, seperti hidroksil ($\bullet\text{OH}$) dan ($\bullet\text{O}_2^-$), yang berperan penting dalam reaksi oksidasi-reduksi untuk menguraikan polutan dalam air limbah (Muraro et al., 2020). Proses degradasi fotokatalitik memiliki sejumlah keunggulan, antara lain biaya operasional lebih rendah, pengoperasian yang mudah, ramah lingkungan serta kemampuan degradasi yang berlangsung dengan cepat (El

Messaoudi et al., 2024). Dalam proses ini, keberadaan katalis memegang peranan penting, khususnya dalam meningkatkan luas permukaan aktif yang berkontribusi terhadap efisiensi reaksi fotokatalitik (Syed et al., 2023).

Semikonduktor telah banyak digunakan sebagai material fotokatalis karena pendekatan ini dinilai praktis dalam detoksifikasi lingkungan (Taghizadeh et al., 2021). Beberapa jenis semikonduktor yang umum digunakan sebagai fotokatalis antara lain ZnO (Malekkiani et al., 2022), TiO₂ (Irfan et al., 2022), SnO₂ (Ramanathan & Murali, 2022), CuO (Jeevarathinam & Asharani, 2024), dan NiO (Arun et al., 2025). Di antara material tersebut, ZnO merupakan salah satu semikonduktor fotokatalis yang paling banyak digunakan karena memiliki beberapa keunggulan, seperti biaya produksi yang rendah, tidak beracun, serta memiliki reaktivitas fotokatalitik yang tinggi (Irani & Amoli-Diva, 2020).

ZnO memiliki celah pita energi sebesar 3,37 eV, energi pengikat sebesar 60 meV, serta stabil terhadap korosi optik dan kimia. Sifat-sifat ini menjadikan ZnO mampu menghasilkan pasangan elektron-lubang yang signifikan dalam proses degradasi senyawa organik

(Malekkiani et al., 2022). Ketika ZnO disinari dengan cahaya ultraviolet yang energinya sama atau lebih besar dari celah pita energi semikonduktor, elektron akan tereksitasi dari pita valensi ke pita konduksi dan menghasilkan lubang di pita valensi. Lubang ini baik secara langsung maupun tidak langsung, dapat bereaksi dengan ion hidroksida (OH^-) dalam kondisi pH netral hingga basa untuk membentuk radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$), yang dikenal sangat reaktif dan berperan penting dalam oksidasi senyawa organik (Bagheri et al., 2020).

Salah satu kelemahan utama dari semikonduktor ZnO sebagai fotokatalis adalah terjadinya rekombinasi yang cepat antara pasangan lubang dan elektron yang terbentuk, sehingga menghambat efisiensi dalam menghilangkan serta menghancurkan polutan organik. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, berbagai modifikasi telah dilakukan, antara lain melalui doping dengan unsur logam seperti Ag atau Fe (Bawazeer et al., 2021; Taghizadeh et al., 2021), menggabungkan ZnO dengan semikonduktor lain untuk menciptakan perbedaan energi seperti TiO_2 (Pinzari, 2024), atau dengan menambahkan bahan berbasis karbon yang dapat

membantu memfasilitasi pemisahan muatan seperti *graphene oxide* (GO) (Lin et al., 2020) atau *carbon nanotube* (CNT) (Bagheri et al., 2020).

Salah satu modifikasi yang efektif adalah penambahan *carbon nanotube* (CNT) ke dalam struktur ZnO. CNT merupakan material karbon dengan struktur tabung nanoskopik berdinding satu atau lebih, yang memiliki konduktivitas listrik tinggi, stabilitas kimia yang baik, dan luas permukaan spesifik yang besar. Berdasarkan jumlah dinding tabungnya, CNT dibedakan menjadi *single-walled carbon nanotube* (SWCNT) dan *multi-walled carbon nanotube* (MWCNT) (Alkaim et al., 2015). Di antara keduanya, MWCNT lebih sering digunakan dalam aplikasi fotokatalitik karena proses sintesisnya yang relatif lebih mudah, biaya produksi yang lebih rendah, serta stabilitas struktur yang lebih tinggi dibandingkan SWCNT (Irani & Amoli-Diva, 2020).

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa penggabungan ZnO dengan material nano karbon seperti MWCNT lebih efektif dibandingkan penggunaan ZnO secara tunggal (Bagheri et al., 2020; Malekkiani et al., 2022; Sarvalkar et al., 2024). Efektivitas ini disebabkan oleh kemampuan MWCNT

dalam menghambat laju rekombinasi pasangan elektron-lubang melalui mekanisme penerimaan elektron dari ZnO. Selain itu, MWCNT memiliki konduktivitas listrik dan termal yang tinggi, kekuatan mekanik yang besar, elastisitas yang baik, aktivitas katalitik yang tinggi, luas permukaan yang besar, porositas yang tinggi (Ashrafi et al., 2021; Bagheri et al., 2020). Karakteristik lain, seperti stabilitas kimia yang baik dan ketahanan terhadap korosi, turut berperan dalam menekan terjadinya fotokorosi ZnO dalam struktur komposit MWCNT/ZnO sehingga meningkatkan efisiensi dan kestabilan proses fotokatalitik. (Malekkiani et al., 2022; Sarvalkar et al., 2024). Telah ditunjukkan penggunaan MWCNT yang telah difungsionalisasi untuk memodifikasi ZnO dapat meningkatkan aktivitas fotokatalitik melalui peningkatan penyerapan cahaya, memperluas permukaan aktif, dan meningkatkan transportasi muatan selama proses fotokatalitik (Bagheri et al., 2020; Malekkiani et al., 2022).

Untuk membentuk sistem fotokatalis yang stabil dan mudah diaplikasikan, digunakan bahan pendukung yang dapat menyatukan komponen aktif fotokatalis dalam suatu struktur yang homogen dan

berdistribusi baik. Salah satu pendekatan yang digunakan adalah dengan memanfaatkan bahan berbasis polimer sebagai matriks penyusun material komposit. Dalam beberapa dekade terakhir, perhatian yang besar telah diarahkan pada penggunaan polimer yang dapat terurai dan terdegradasi secara hayati, seperti *polylactic acid* (PLA), *polybutylene succinate* (PBS), *polyhydroxyalkanoate* (PHA). Di antara berbagai jenis polimer tersebut, PLA menjadi salah satu yang paling banyak digunakan karena merupakan polimer biodegradable yang berasal dari sumber daya terbarukan, seperti pati dan gula, serta menunjukkan karakteristik yang ideal untuk digunakan dalam produk konsumen, kemasan, dan berbagai aplikasi berbasis material komposit (Luo et al., 2018; Radwan-Pragłowska et al., 2020; Sun et al., 2022).

Polylactic acid (PLA) memiliki kelemahan berupa elastisitas yang rendah, sehingga dapat menyulitkan dalam proses pembentukan lembar tipis komposit yang fleksibel dan stabil. Untuk mengatasi hal tersebut, ditambahkan polietilen glikol (PEG) sebagai agen *plasticizer* yang berfungsi meningkatkan fleksibilitas material. PEG diketahui mampu meningkatkan mobilitas rantai polimer PLA, sehingga

menghasilkan struktur komposit yang lebih lentur dan stabil secara mekanik. Polietilen glikol (PEG) merupakan salah satu *plasticizer* paling efisien untuk PLA karena sifatnya yang biokompatibel, mudah terdispersi, memiliki mobilitas tinggi, tidak toksik, serta sangat hidrofilik (Durmaz & Aytac, 2021). Selain perannya sebagai *plasticizer*, PEG juga memberikan kontribusi penting dalam meningkatkan kinerja sistem fotokatalis. PEG memiliki kemampuan mengontrol dispersi nanopartikel dalam matriks polimer, sehingga mencegah terjadinya aglomerasi. Selain itu sifat hidrofilik PEG memungkinkan terjadinya interaksi yang lebih baik antara permukaan material dan zat warna, sehingga memperluas kontak dan meningkatkan efisiensi degradasi polutan organik melalui proses fotokatalitik (Brogly et al., 2024; Sheikhi et al., 2023).

Beberapa penelitian sebelumnya telah mengkaji pengembangan material fotokatalis berbasis semikonduktor ZnO yang dimodifikasi dengan berbagai material pendukung guna meningkatkan efisiensi degradasi polutan organik. Penelitian oleh Bagheri et al. (2020) menunjukkan bahwa penambahan MWCNT pada ZnO dapat secara

signifikan menurunkan laju rekombinasi pasangan elektron-lubang, sehingga meningkatkan aktivitas fotokatalitik. Selain itu, penelitian yang dilakukan oleh Wang et al. (2024) menjelaskan bahwa penambahan PLA pada material fotokatalis berbasis semikonduktor dapat meningkatkan degradasi fotokatalitik. Penelitian lain yang dilakukan oleh Durmaz & Aytac. (2021) menyatakan bahwa penggunaan *polyethylene glycol* (PEG) sebagai *plasticizer* mampu meningkatkan fleksibilitas serta mendukung dispersi partikel aktif dalam matriks PLA. Berdasarkan uraian tersebut, dapat disimpulkan bahwa pengembangan material fotokatalis berbasis komposit PLA/PEG yang dimodifikasi dengan MWCNT dan ZnO memiliki potensi besar dalam meningkatkan efisiensi degradasi polutan organik, khususnya zat warna sintetik seperti *brilliant green*. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk melakukan fabrikasi dan karakterisasi lembar tipis komposit PLA/PEG/MWCNT/ZnO serta mengevaluasi kinerjanya sebagai material fotokatalis dalam proses degradasi zat warna, sebagai bagian dari kontribusi terhadap teknologi ramah lingkungan dan pengolahan limbah cair berkelanjutan.

B. Rumusan Masalah

1. Bagaimana struktur kristal dari lembar tipis PLA/PEG/MWCNT/ZnO?
2. Bagaimana komposisi gugus fungsi dari lembar tipis PLA/PEG/MWCNT/ZnO?
3. Bagaimana variasi komposisi material memengaruhi perubahan sudut kontak dan sifat interaksi permukaan dengan air?
4. Bagaimana efisiensi degradasi fotokatalis lembar tipis PLA/PEG/MWCNT/ZnO terhadap zat warna *brilliant green*?

C. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini antara lain:

1. Untuk mengetahui struktur kristal dari lembar tipis PLA/PEG/MWCNT/ZnO
2. Untuk mengetahui komposisi gugus fungsi dari lembar tipis PLA/PEG/MWCNT/ZnO
3. Untuk mengetahui pengaruh variasi komposisi material terhadap perubahan sudut kontak serta sifat interaksi permukaan material dengan air, guna memahami karakteristik hidrofilisitas atau hidrofobisitas permukaan yang terbentuk

4. Untuk mengetahui efisiensi degradasi fotokatalis lembar tipis PLA/PEG/MWCNT/ZnO terhadap zat warna *brilliant green*

D. Batasan Masalah

Penelitian ini terdapat beberapa batasan masalah sebagai berikut:

1. Bahan yang digunakan untuk fabrikasi lembar tipis adalah PLA, PEG, MWCNT, dan ZnO
2. Metode fabrikasi lembar tipis yang digunakan adalah *solution casting*.
3. Lembar tipis PLA/PEG/MWCNT/ZnO akan diaplikasikan pada fotokatalisis zat warna *brilliant green* pada limbah tekstil
4. Karakterisasi lembar tipis menggunakan XRD, FTIR, dan uji sudut kontak.

E. Manfaat Penelitian

1. Sebagai salah satu alternatif untuk membuat lembar tipis dengan bahan baku polimer.
2. Sebagai kontribusi pada pengembangan material komposit baru dengan sifat adsorpsi yang baik.
3. Sebagai studi kasus atau proyek akhir yang relevan bagi mahasiswa yang dapat dikembangkan lebih lanjut.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Landasan Teori

1. Komposit

Komposit merupakan material heterogen yang terdiri dari dua fase padat atau lebih dalam skala besar, yang dirancang untuk memiliki sifat mekanik yang lebih baik dibandingkan komponen penyusunnya (Samlawi et al., 2018). Sifat material komposit merupakan kombinasi dari sifat yang berbeda antara matriks dan penguat. Penguat dipilih secara khusus untuk meningkatkan sifat mekanik dan fisik dari matrik. Sehingga keduanya saling melengkapi untuk membuat material dengan sifat yang diinginkan (Tjahjanti, 2018). Tujuan utama pembuatan komposit adalah untuk meningkatkan sifat mekanik material, mengurangi berat, dan lebih mudah dibentuk dibandingkan bahan asalnya (Hazhari et al., 2022). Matriks berfungsi sebagai perekat yang menyatukan serat-serat menjadi struktur komposit yang kokoh. Material matriks dapat berupa polimer, logam, atau keramik, masing-masing dengan sifat dan

keunggulan yang berbeda (Chairul Iswan et al., 2018).

Berdasarkan jenis matriksnya, material komposit dapat diklasifikasikan menjadi:

- a. *Metal Matrix Composite* (MMC): Komposit dengan matriks logam, seperti aluminium. MMC menawarkan kekuatan tinggi, ketahanan suhu tinggi, dan ketahanan korosi yang baik.
- b. *Ceramic Matrix Composite* (CMC): Komposit dengan matriks keramik. CMC memiliki kekuatan yang sangat tinggi, ketahanan suhu yang ekstrem, dan ketahanan terhadap berbagai jenis lingkungan.
- c. *Polymer Matrix Composite* (PMC): Komposit dengan matriks polimer. PMC menawarkan fleksibilitas, bobot ringan, dan biaya produksi yang lebih rendah dibandingkan jenis komposit lainnya (Tjahjanti, 2018).

Penguat (*reinforcement*) atau pengisi (*filler*) adalah bahan tambahan yang dicampurkan ke dalam matriks untuk meningkatkan kekuatan dan sifat-sifat lainnya dari material komposit. Fungsi utama penguat adalah untuk memperkuat matriks dan memberikan sifat-sifat khusus pada material

komposit. Berdasarkan jenis dan susunan penguatnya, komposit dapat diklasifikasikan menjadi:

- a. Komposit Serat (*Fibrous Composites*): Komposit yang menggunakan serat sebagai penguat utama, di mana serat disusun dalam satu lapisan, seperti kaca atau karbon.
- b. Komposit Laminat (*Laminated Composite*): Komposit yang terdiri dari beberapa lapisan yang direkatkan, setiap lapisan memiliki orientasi serat yang berbeda untuk memberikan sifat mekanik yang spesifik.
- c. Komposit Partikel (*Particulate Composite*): Komposit yang menggunakan partikel kecil sebagai penguat, tersebar merata dalam matriks untuk meningkatkan sifat tertentu seperti kekakuan atau ketahanan aus (Hidayat, 2020).

Komposit polimer dibuat dengan menggabungkan polimer dengan bahan pengisi seperti serbuk, kalsium karbonat, atau serat untuk memperbaiki sifat-sifatnya. Namun, untuk mencapai peningkatan sifat yang signifikan, seringkali dibutuhkan jumlah pengisi yang cukup

besar. Penggunaan bahan pengisi dalam jumlah besar dapat mengurangi kelenturan dan membuat komposit menjadi rapuh. Komposit polimer menawarkan keunggulan dalam fleksibilitas desain dan bobot yang ringan dibandingkan dengan logam. Hal ini memungkinkan produksi komponen dengan bentuk kompleks dan efisiensi bahan bakar yang lebih tinggi, sehingga banyak digunakan dalam berbagai industri seperti transportasi dan olahraga (Tarhini & Tehrani-Bagha, 2019; Vaggar & Kamate, 2020; Wu & Drzal, 2016; T. Zhang et al., 2019).

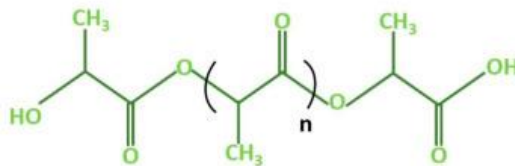
2. *Polylactic Acid (PLA)*

PLA adalah poliester alifatik yang dapat terurai secara hayati dan bioresorbable, yang dapat diperoleh dari produk alami seperti jagung dan tebu (Jayasekara et al., 2022). Asam polilaktat termasuk dalam keluarga asam poli- α -hidroksi, sejenis poliester termoplastik alifatik linier, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1 (Ranakoti et al., 2022). PLA sendiri memiliki bentuk kristal ortorombik (Kim et al., 2019). Asam polilaktat atau Polilaktida (PLA) berasal dari asam laktat monomer, yaitu asam propionat 2-hidroksi, yang diproduksi dari bahan terbarukan seperti pati atau

gula, melalui fermentasi. PLA dapat dipecah menjadi air dan karbon dioksida oleh mikroba dan sepenuhnya dapat terurai secara hayati (G. Li et al., 2020). Awalnya, PLA diasumsikan sebagai biomaterial potensial karena non toksisitas dan kompatibilitasnya yang sangat baik dengan sel manusia (R et al., 2021). Penggunaan PLA telah meluas ke berbagai bidang farmasi, seperti sebagai pembawa obat, serta dalam rekayasa jaringan untuk menciptakan bahan implan yang kuat dan aman (Santoro et al., 2016). PLA, yang merupakan polimer hasil olahan sumber daya terbarukan, termasuk dalam kelompok poliestер alifatik linier termoplastik. Polimer ini memiliki sifat biodegradable, artinya dapat terurai secara alami melalui reaksi kimia dengan air (hidrolisis) atau dengan bantuan enzim (Rihayat et al., 2020).

PLA, bersama dengan sebagian besar produknya, larut dalam berbagai pelarut, termasuk dioksan, kloroform, asetonitril, metilen klorida, asam trikloroasetat, dan 1, 1, 2-trikloroetana. Penggunaan kloroform sebagai pelarut dipilih karena kloroform memiliki polaritas yang sesuai dengan sifat kimia PLA, sehingga dapat melarutkan

PLA dengan baik. Selain itu, kloroform mampu melarutkan PLA pada suhu ruang, sehingga menghindari risiko degradasi termal pada PLA. Berbagai jenis polimer PLA adalah: PLLA murni (asam poli-L-laktat), PDLA murni (asam poli-D-laktat), dan PDLLA (poli-D, asam L-laktat) [28]. PLLA serta PDLA adalah polimer semi-kristal tetapi PDLLA adalah polimer amorf. PLA tidak memiliki struktur kristal yang teratur seperti logam atau mineral. Sebagian besar PLA bersifat amorf, tetapi dapat membentuk domain kristalin kecil yang memberikan sifat mekanik tertentu. (Shekhar & Mondal, 2024).



Gambar 2. 1 Struktur kimia PLA

3. *Polyethylene glycol (PEG)*

Polietilen glikol (PEG) merupakan polimer semi-kristalin yang bersifat biokompatibel dan hidrofilik dengan rumus kimia $\text{H}-(\text{OCH}_2\text{CH}_2)_n\text{OH}$, yang dapat disintesis melalui proses polimerisasi anionik, kationik, maupun melalui mekanisme

pembukaan monomer etilen glikol. PEG termasuk ke dalam jenis polimer sintetis berbasis oksietilen yang memiliki sifat stabil, mudah larut dalam air hangat, tidak beracun, non korosif, tidak berbau, tidak berwarna, memiliki titik lebur yang relatif tinggi, serta bersifat higroskopis. Polietilen glikol (PEG) digunakan dalam berbagai produk industri, antara lain sebagai bahan pengikat dan basa dalam formulasi kosmetik, bahan plastis (*plasticizer*) yang berfungsi untuk meningkatkan fleksibilitas dan elastisitas lapisan perekat (Kumar et al., 2023), deterjen dalam produk rumah tangga, serta pelarut bersama air yang berfungsi mengurangi polaritas larutan untuk meningkatkan kelarutan senyawa organik. Dalam kehidupan sehari-hari, PEG juga dimanfaatkan dalam campuran cat, tinta, kosmetik, perlengkapan mandi, serta dalam industri kertas, kulit, dan karet (Bento et al., 2024).

Secara umum, polyethylene glycol (PEG) memiliki rentang berat molekul antara 200 hingga 300.000, di mana karakteristik kimia dan fisiknya sangat dipengaruhi oleh besar kecilnya berat molekul tersebut. Selain mempengaruhi sistem penamaannya, berat molekul juga menentukan

densitas, sifat fisik, serta sifat kimia dari PEG. PEG dengan berat molekul di bawah 1000 umumnya berwujud cairan bening tak berwarna, sedangkan PEG dengan berat molekul di atas 1000 biasanya berbentuk padatan menyerupai lilin berwarna putih. Seiring bertambahnya berat molekul, kepadatan dan kekerasan PEG cenderung meningkat. (Brogly et al., 2024).

4. *Multi Wall Carbon Nanotube (MWCNT)*

Iijima menemukan karbon nanotube (CNT) dengan sifat uniknya yang mencakup struktur, elektronik, optoelektronik, semikonduktor, mekanik (Sadegh et al., 2014). Secara umum, CNT dapat dikategorikan menjadi dua jenis utama: karbon nanotube dinding tunggal *Single Wall Carbon Nanotubes* (SWCNT) dan karbon nanotube dinding banyak *Multi Wall Carbon Nanotubes* (MWCNT) seperti pada Gambar 2.2 (Handayani et al., 2022). MWCNT tersusun atas beberapa lembar *graphene* yang digulung dengan celah antar lapisan *graphene* sekitar 0,34 nm rata-rata berbentuk silinder yang saling tersusun secara konsentris mengelilingi rongga tengah (Oliveira & Beatrice, 2019).

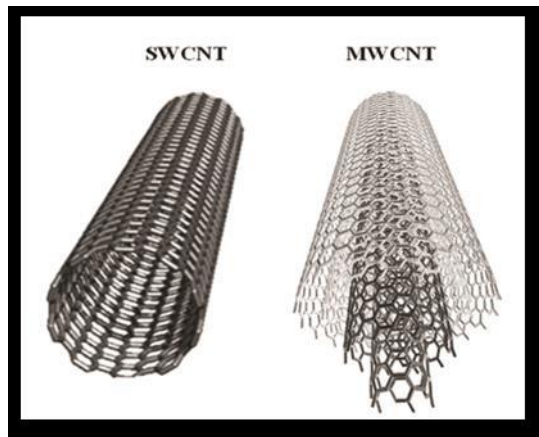
SWCNT tidak larut dalam air dan mudah menggumpal, sementara MWCNT memiliki kelarutan yang lebih baik dalam air, membentuk dispersi koloid (Beg et al., 2018). Mengingat sifat mekanik, listrik, dan termalnya yang unggul, MWCNT menjadi salah satu material paling potensial untuk pengembangan perancah komposit (Anaraki et al., 2015). Struktur MWCNT dapat dikategorikan menjadi tiga jenis utama, yaitu armchair, zigzag, dan chiral. Struktur armchair memiliki pola atom karbon yang simetris, sedangkan struktur zigzag membentuk pola zigzag yang khas. Struktur chiral merupakan kombinasi dari keduanya, menghasilkan pola yang lebih kompleks (Gintu & Puspita, 2020).

MWCNT berperan sebagai penguat yang sangat efektif dalam komposit. Dengan membentuk jaringan yang kuat di dalam matriks polimer, MWCNT mampu meningkatkan daya tahan material terhadap beban dan mencegah terjadinya kerusakan (Alexa-Stratulat et al., 2023; Arunkuma et al., 2020). MWCNT secara signifikan meningkatkan ketahanan suhu dari komposit. Dengan adanya MWCNT, komposit dapat bertahan

pada suhu yang lebih tinggi tanpa mengalami degradasi (Yan et al., 2024). Luas permukaan spesifik MWCNT yang tinggi membuatnya menjadi fotokatalis yang sangat efektif. Hal ini memungkinkan MWCNT untuk berinteraksi dengan berbagai jenis molekul polutan, sehingga dapat digunakan dalam berbagai aplikasi pemurnian air (Feijoo et al., 2021). Penambahan multi walled carbon nanotube (MWCNT) pada material komposit secara signifikan meningkatkan sifat mekanik, termal, dan listrik. MWCNT dapat meningkatkan kekuatan tarik dan modulus elastisitas matriks polimer seperti polikarbonat, namun konsentrasi yang terlalu tinggi dapat menyebabkan penurunan ketangguhan (Sabet, 2024; Stanciu et al., 2021).

MWCNT mudah dimodifikasi dan difungsionalisasi. Proses fungsionalisasi MWCNT bertujuan untuk menghilangkan partikel katalis residu dan kontaminan seperti logam Fe, ferrosin, dan residu benzena yang tidak terbakar, yang terbentuk selama tahap sintesis MWCNT. Selain itu, fungsionalisasi dilakukan untuk menghilangkan karbon amorf serta meningkatkan luas permukaan MWCNT akibat cacat atau rongga. Proses ini juga

berfungsi untuk mengubah karakteristik MWCNT dari hidrofobik menjadi hidrofilik melalui penambahan gugus fungsional hidroksil (-OH). Fungsionalisasi MWCNT dapat dilakukan dengan menggunakan bahan kimia tertentu, seperti berbagai jenis asam atau campuran asam, misalnya HNO_3 , $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{HNO}_3$, $\text{HCL}/\text{H}_2\text{SO}_4/\text{HNO}_3$, H_2O_2 , KMnO_4 , $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7/\text{H}_2\text{SO}_4$, dan $\text{KMnO}_4/\text{H}_2\text{SO}_4$ (Handayani et al., 2022).



Gambar 2. 2 SWCNT dan MWCNT (Youssef, 2016)

5. Seng Oksida (ZnO)

Seng Oksida (ZnO) adalah semikonduktor yang umum digunakan sebagai fotokatalis. Pemilihan ZnO sebagai fotokatalis didasarkan pada beberapa faktor, antara lain ketahanan terhadap korosi yang

baik, proses sintesis yang relatif mudah, dan aktivitas fotokatalitik yang tinggi (Anggita & Susanto, 2016). Selain itu, ZnO memiliki energi celah pita sebesar 3,37 eV, yang memberikan mobilitas elektron yang lebih tinggi dan umur pakai yang lebih panjang dibandingkan dengan titanium dioksida (TiO_2) (Taheri et al., 2017). Seng oksida (ZnO) dapat membentuk tiga jenis struktur kristal, yaitu wurtzite heksagonal, zincblende kubik, dan rocksalt kubik. Di antara ketiga struktur tersebut, wurtzite heksagonal merupakan struktur yang paling stabil pada suhu ruangan (Saputra et al., 2020). Jenis-jenis struktur kristal ZnO ditunjukkan pada Gambar 2.3 Seng oksida (ZnO) dapat ditemukan secara alami di bumi dalam bentuk mineral yang dikenal sebagai zincite (Astuti et al., 2022).

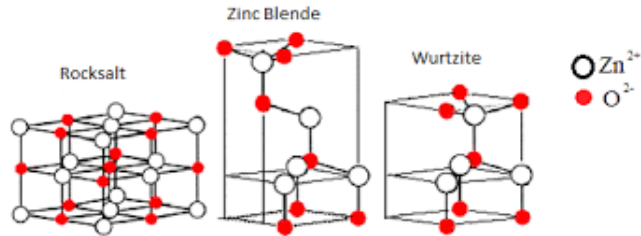
Ada beberapa metode yang dapat digunakan untuk mensintesis ZnO, yaitu metode kimia, fisik, dan biologis. Baru-baru ini, biosintesis seng oksida mulai mendapat perhatian lebih karena keunggulannya. Metode biologis bersifat ramah lingkungan, tidak beracun, dan hemat biaya (Bhalla et al., 2023; Minhas et al., 2023). Pemanfaatan

sumber daya alam, seperti daun, akar, ekstrak bunga, serta mikroorganisme seperti bakteri, jamur, dan alga merupakan salah satu pendekatan yang aman untuk sintesis nanopartikel, karena penggunaan senyawa beracun dapat diminimalkan (Behravan et al., 2019).

Tanaman kelor (*Moringa oleifera*) dikenal kaya akan nutrisi karena mengandung berbagai senyawa fitokimia penting. Profil fitokimia daunnya menunjukkan adanya mineral esensial, vitamin, sterol, antrakuinon, alkaloid, terpenoid, flavonoid, tannin, dan saponin (Adam et al., 2021). *Moringa oleifera* merupakan salah satu tanaman yang melimpah di alam dengan laju pertumbuhan yang relatif cepat. Ekstrak daun kelor mengandung senyawa fitokimia seperti flavonoid (9,31%), tanin (11,43%), dan polifenol (8,53%) (Adekanmi et al., 2020). Senyawa-senyawa fitokimia tersebut berperan penting sebagai agen pereduksi sekaligus stabilisator selama proses pembentukan nanopartikel ZnO (Muhaimin et al., 2023). Selain itu, senyawa fenolik dalam daun kelor merupakan sumber antioksidan dan antimikroba yang baik

yang dapat, sehingga berpotensi digunakan dalam industri farmasi dan pangan (Adam et al., 2021).

Komposit ZnO-polimer menawarkan solusi yang menjanjikan dalam bidang adsorpsi. Luas permukaan ZnO yang besar, ditambah dengan sifat sinergis dari matriks polimer, menghasilkan material dengan kapasitas adsorpsi yang tinggi. Selain itu, sifat ramah lingkungan dan biaya produksi yang rendah membuat komposit ini semakin menarik untuk diaplikasikan dalam berbagai bidang, termasuk pengolahan air dan lingkungan (Slamet et al., 2021). Penambahan seng oksida (ZnO) pada material komposit memberikan peningkatan signifikan pada sifat mekanik, seperti kekuatan tarik dan kekerasan. Selain itu, sifat fotokatalitik ZnO yang kuat membuatnya sangat efektif dalam aplikasi lingkungan. ZnO juga dikenal memiliki sifat antimikroba yang baik (Singh et al., 2024).



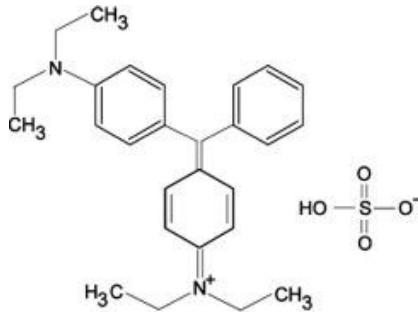
Gambar 2. 3 Struktur Kristal (Astuti et al., 2022)

6. *Brilliant Green* (BG)

Berdasarkan struktur kimia, khususnya keberadaan kromofor, zat warna dapat dikategorikan ke dalam lima kelompok utama: antrakuinon, azo, indigoid, ftalocianina, dan arilmetana (Abdulhadi et al., 2019). Selain klasifikasi berdasarkan struktur, zat warna juga dapat dikelompokkan menjadi dua kategori besar, yaitu organik (berbasis karbon) dan anorganik, serta berdasarkan sumbernya, yaitu alami atau industri (Hashim et al., 2019; Paraschiv et al., 2015). Dari sekian banyak jenis pewarna kimia, pewarna azo cukup menonjol karena menyumbang lebih dari setengah produksi pewarna di awal perkembangan industry pewarna. Kelompok pewarna inilah yang paling banyak diproduksi, bahkan mencapai lebih dari separuh total produksi pewarna pada masa-

masa awal perkembangan industri pewarna (Rehman et al., 2019).

Pewarna dan pigmen secara luas diklasifikasikan sebagai anionik, kationik dan nonionik, tergantung pada muatan ionik molekulnya. Pewarna kationik dianggap sebagai kelas yang lebih beracun dibandingkan dengan yang anionik dan non-ionik (El Hajam et al., 2019). *Brilliant green* (BG) merupakan pewarna kationik yang sangat berbahaya bagi manusia dan sering digunakan dalam industri. Pewarna ini memiliki berbagai kegunaan, termasuk dalam bidang biologi, dermatologi, dan peternakan (Nandi & Patel, 2017; Singh et al., 2016). Namun, kontak dengan zat ini dapat menyebabkan masalah kesehatan serius seperti iritasi pada saluran pencernaan dan pernapasan, serta dermatitis (Ragab et al., 2019). Pemanasan pewarna BG menghasilkan gas beracun seperti karbon dioksida, nitrogen oksida, dan sulfur oksida (Laskar & Kumar, 2019). Struktur *brilliant green* seperti pada Gambar 2.4.



Gambar 2. 4 Struktur molekul kimia *brilliant green* (Nandi & Patel, 2017).

7. Fotokatalisis

Fotokatalisis merupakan proses reaksi fotokimia yang berlangsung dengan bantuan cahaya dan material katalis. Proses ini merupakan perpaduan antara prinsip fotokimia, yang melibatkan interaksi dengan cahaya (foton), dan katalis, yang percepatan laju reaksi oleh suatu zat tanpa mengalami perubahan kimia secara permanen (Anggita & Setiawan, 2021). Dalam sistem fotokatalitik, fotokatalis yang umum digunakan berupa bahan semikonduktor yang memiliki pita valensi terisi elektron dan pita konduksi yang terisi lubang. Ketika disinari dengan cahaya yang memiliki energi sesuai atau lebih tinggi dari celah pita (band gap), elektron akan tereksitasi dari pita valensi ke pita konduksi, membentuk pasangan muatan (elektron dan lubang). Muatan ini

akan memicu terjadinya reaksi reduksi dan oksidasi (redoks), yang memungkinkan terjadinya degradasi senyawa tertentu menjadi produk yang lebih sederhana (Tseng et al., 2010).

Mekanisme fotokatalisis umumnya dipengaruhi oleh panjang gelombang cahaya, energi foton, dan jenis katalis yang digunakan. Semikonduktor berperan sebagai katalis sekaligus sensitiser dalam proses reaksi redoks karena struktur elektroniknya. Proses dimulai dengan fotoeksitasi, yaitu ketika foton dengan energi $h\nu$ diserap oleh permukaan semikonduktor. Energi ini menyebabkan elektron tereksitasi dari pita valensi ke pita konduksi, meninggalkan lubang positif (h^+) di pita valensi (Ajmal et al., 2014). Elektron yang tereksitasi bergerak ke permukaan katalis dan terlibat dalam reaksi dengan molekul akseptor, sementara lubang valensi bereaksi dengan air membentuk radikal hidroksil ($\bullet OH$) melalui proses ionisasi. Radikal hidroksil yang terbentuk kemudian bereaksi dengan polutan organik yang teradsorpsi di permukaan katalis. Di sisi lain, elektron pada pita konduksi bereaksi dengan oksigen terlarut membentuk anion superoksida,

yang selanjutnya dapat menghasilkan peroksida atau hidrogen peroksida. Produk-produk ini memiliki pasangan elektron bebas yang sangat reaktif, sehingga efektif dalam mendegradasi polutan organik dan berperan dalam pemecahan air. Proses ini berlangsung secara siklik hingga reaksi selesai (M. M. Khan et al., 2015).

Semikonduktor yang umum digunakan sebagai material fotokatalis adalah logam oksida. Hal ini disebabkan oleh sebagian pasangan elektron dan hole yang tereksitasi namun tidak mengalami rekombinasi akan berdifusi menuju permukaan katalis. Pasangan elektron dan hole yang berada di permukaan katalis akan mengalami reaksi kimia berupa oksida dan reduksi. Reaksi tersebut mampu mengubah senyawa organik maupun anorganik yang terdapat di dalam air menjadi karbon dioksida (CO_2) dan air (H_2O). Proses fotokatalis dengan bantuan sinar UV dapat mendegradasi polutan menjadi senyawa yang tidak beracun. Teknologi fotokatalis ini terbukti efektif dalam menghilangkan zat berbahaya serta bakteri yang berpotensi merugikan kesehatan manusia (Anggita & Setiawan, 2021).

8. Karakterisasi

a. XRD (*X-Ray Diffraction*)

X-ray Diffraction (XRD) merupakan teknik karakterisasi material yang digunakan untuk menganalisis struktur kristal berdasarkan pola difraksi sinar-x. Sinar-X adalah foton berenergi tinggi yang memiliki panjang gelombang antara 0,5 hingga 2,5 Å. Ketika sinar-X berinteraksi dengan suatu material, sebagian sinar akan diserap, diteruskan, dan sebagian lagi terhambur difraksi. Difraksi yang terhambur inilah yang dideteksi oleh XRD (Fatimah et al., 2022; Hakim et al., 2019).

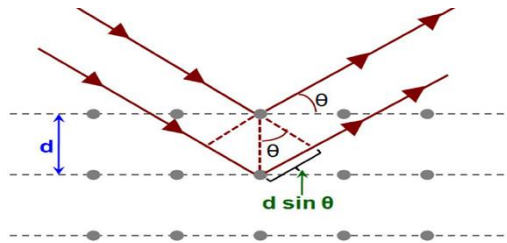
Prinsip kerja XRD terdiri atas tiga komponen utama, yaitu tabung sinar-X, tempat sampel, dan detektor. Sinar-X dihasilkan dari tabung yang berisi katoda pemanas, yang memancarkan elektron menuju anoda dengan kecepatan tinggi. Tumbukan antara elektron dan target logam menghasilkan pancaran sinar-X (Astuti, 2016). Sinar-X ini kemudian diarahkan ke permukaan sampel. Ketika mengenai sampel,

sebagian sinar-X akan dihamburkan oleh atom-atom dalam kisi kristal dan ditangkap oleh detektor. Detektor kemudian mengubah sinyal ini menjadi data yang divisualisasikan dalam bentuk grafik intensitas terhadap sudut (Setiabudi et al., 2012).

Ketika sinar-X mengenai bidang-bidang atom sejajar dalam struktur kristal, Sebagian sinar akan dipantulkan. Jika sinar-X yang dibelokkan ini bertemu kembali dalam keadaan sefase, akan terjadi interferensi konstruktif dan intensitas sinar yang terdeteksi akan tinggi. Sebaliknya, jika bertemu dalam keadaan tidak sefase, akan terjadi interferensi destruktif dan intensitasnya akan rendah. Pola interferensi inilah yang direkam oleh detektor dan diplot dalam bentuk grafik terhadap sudut difraksi. Mekanisme difraksi ini dijelaskan oleh Hukum Bragg, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 2.5, yang menyatakan bahwa interferensi konstruktif akan terjadi apabila memenuhi kondisi yang menyatakan dalam Persamaan 2.1 (Astuti, 2016).

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (2.1)$$

Dimana n adalah orde difraksi, λ adalah panjang gelombang ($\text{CuK}\alpha = 1,5406 \text{ \AA}$), d adalah jarak antar bidang, dan θ adalah sudut difraksi ($^\circ$).



Gambar 2. 5 Difraksi Sinar-X

Selain itu, data XRD juga dapat digunakan untuk menentukan ukuran kristalit. Ukuran kristalit dihitung berdasarkan lebar puncak pada difraktogram XRD menggunakan persamaan Debye-Scherrer, sebagaimana ditunjukkan pada persamaan 2.2.

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (2.2)$$

Dimana D adalah ukuran kristal, K adalah konstanta Scherrer (0,9), λ adalah panjang gelombang sinar-X, β adalah lebar penuh pada setengah maksimum (FWHM) dari puncak difraksi yang dipilih dalam radian,

dan θ adalah sudut difraksi Bragg (Mahajan et al., 2025).

Derajat kristalinitas suatu material dapat dihitung untuk mengetahui sejauh mana struktur kristalin terbentuk dalam sampel. Nilai derajat kristalinitas ini diperoleh dengan membandingkan area puncak kristalin dan amorf pada pola XRD. Hubungan antara area tersebut dinyatakan dalam persamaan 2.3.

$$X_c = \frac{A_c}{A_c + A_a} \quad (2.3)$$

Dimana luas puncak difraksi kristal (A_c) dan luas puncak difraksi amorf (A_a) (Doumeng et al., 2021).

b. FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy)

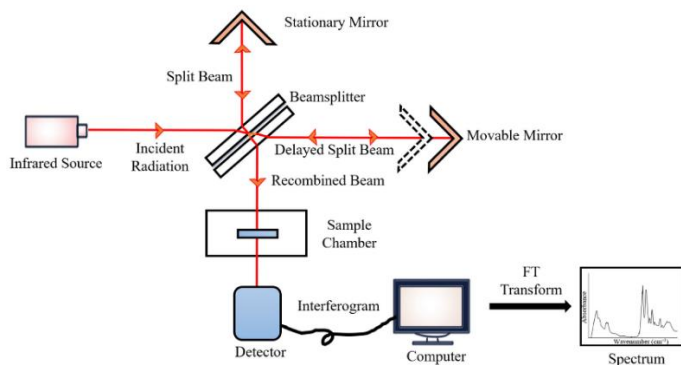
Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) merupakan teknik analisis spektroskopi vibrasi yang memungkinkan karakterisasi struktur kimia suatu senyawa berdasarkan interaksi antara radiasi inframerah dan vibrasi ikatan dalam molekul. Teknik ini memanfaatkan radiasi inframerah

untuk menginduksi vibrasi seperti peregangan (stretching) dan pembengkokan (bending) dalam ikatan kimia, yang hanya dapat terjadi jika perubahan momen dipol molekul menyertai vibrasi tersebut. Masing-masing jenis vibrasi menghasilkan spektrum serapan inframerah yang khas, sehingga dapat digunakan sebagai sidik jari molekuler untuk identifikasi senyawa (Fadlelmoula et al., 2022). Sebagian besar spektrum inframerah diplot dalam rentang 4000-400 cm^{-1} , yang merupakan wilayah inframerah menengah yang paling umum digunakan untuk tujuan analitis, karena ini adalah wilayah paling informatif karena hampir semua mode vibrasi biomolekul aktif pada rentang ini (Smith, 2011). Spektrum yang dihasilkan menunjukkan puncak serapan pada angka gelombang tertentu, yang sesuai dengan frekuensi vibrasi spesifik dari gugus fungsi seperti -OH, -CH, -COOH, -NH, dan lain-lain (Kristianingrum, 2016).

Gambar 2.6 menampilkan prinsip kerja FTIR yang dimulai dari pemancaran radiasi IR

dari sumber cahaya yang diarahkan ke interferometer Michelson, yang terdiri dari beam splitter, cermin tetap (*fixed mirror*), dan cermin bergerak (*moving mirror*). Beam splitter membagi cahaya ke dua jalur, yaitu satu menuju cermin tetap dan satu menuju cermin yang bergerak. Gerakan cermin menghasilkan perbedaan jalur optik antara kedua berkas cahaya. Ketika berkas-berkas ini dipantulkan kembali dan digabungkan, maka akan terjadi interferensi yang menghasilkan interferogram, yaitu sinyal gabungan dari seluruh frekuensi IR yang akan ditransmisikan ke jalur optik berikutnya. Setelah interferogram terbentuk, sinyal cahaya tersebut diteruskan ke sampel, yang diletakkan di jalur optik antara interferometer dan detektor. Di sinilah terjadi proses sinar mengenai sampel, dan Sebagian panjang gelombang diserap oleh molekul dalam sampel sesuai dengan frekuensi vibrasi ikatan-ikatan kimia di dalamnya. Sinar sisa yang tidak diserap oleh sampel akan diteruskan menuju detektor, yang akan

mengukur intensitas sinar sebagai fungsi dari waktu atau posisi cermin. Data interferogram yang dihasilkan detektor ini masih berada dalam domain waktu, sehingga untuk memperoleh spektrum IR yang informatif, interferogram tersebut diubah ke domain frekuensi menggunakan transformasi fourier. Hasil akhir dari proses ini adalah spektrum inframerah, yaitu grafik transmitansi terhadap angka gelombang (cm^{-1}) yang menunjukkan puncak-puncak serapan molekul pada frekuensi tertentu (Fadlelmoula et al., 2022; Smith, 2011; Wong et al., 2023).



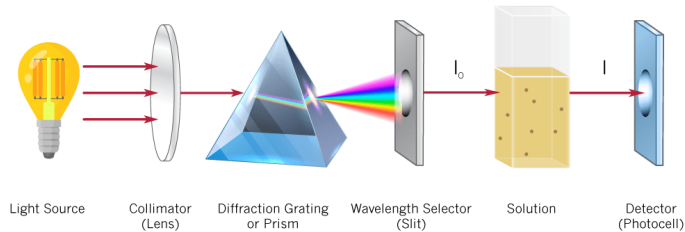
Gambar 2. 6 Skema Prinsip Kerja FTIR (Wong et al., 2023)

c. Sudut Kontak (*Contact Angle*)

Pengukuran sudut kontak merupakan teknik penting dalam karakterisasi sifat daya basah (*wettability*). Sudut kontak adalah sudut yang terbentuk antara droplet dengan permukaan benda padat yang kontak ketika droplet ditetaskan pada permukaan bahan (Huhtamäki et al., 2018; Zhao & Jiang, 2018). Semakin kecil sudut kontak yang terbentuk, maka semakin besar kecenderungan cairan untuk membasahi permukaan tersebut. Permukaan material dengan sudut kontak kurang dari 30° tergolong sangat suka air atau sangat hidrofilik, sedangkan permukaan dengan sudut kontak antara 30 hingga 90 dikategorikan sebagai basah Sebagian. Apabila sudut kontak lebih dari 90, maka permukaan tersebut dianggap tidak suka air atau hidrofobik (Law, 2015; Y. Zhang et al., 2022). Sudut kontak dapat mencerminkan interaksi antara cairan dan permukaan padat, yang dapat diamati secara visual melalui bentuk tetesan fluida di atas permukaan tersebut (T & Herlinda, 2022).

d. Spektrofotometer UV-Vis

Spektrofotometer UV-Vis digunakan untuk mengukur seberapa banyak cahaya yang diserap oleh suatu larutan pada panjang gelombang tertentu. Spektrofotometer ini menggunakan dua sumber cahaya yang berbeda, yaitu sumber cahaya UV dan sumber cahaya tampak (Zurweni & Sanova, 2023). Gambar 2.7 menampilkan prinsip kerja spektrofotometer UV-Vis yang melibatkan proses penguraian cahaya polikromatik menjadi sinar monokromatik oleh monokromator. Sinar monokromatik ini kemudian dilewatkan melalui sampel dalam kuvet. Molekul dalam sampel akan menyerap cahaya pada panjang gelombang spesifik, tergantung pada struktur kimianya. Cahaya yang tidak terserap akan mencapai detektor dan diubah menjadi sinyal listrik. Sinyal listrik ini kemudian diproses oleh instrumen untuk menghasilkan spektrum yang menunjukkan hubungan antara panjang gelombang dan intensitas serapan (Nikam et al., 2022).



Gambar 2. 7 Skema Prinsip Kerja Spektrofotometer UV-Vis

B. Kajian Pustaka

Penelitian oleh Younus et al. (2023) tentang mendorong batas PLA dengan mengeksplorasi kekuatan MWCNT dalam meningkatkan sifat termal, mekanis, dan ketahanan terhadap cuaca. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa penambahan MWCNT ke dalam PLA secara signifikan meningkatkan kristalinitas, menjadikan material lebih elastis dan lentur, namun menurunkan kekuatan tarik maksimumnya. Selain itu, penambahan MWCNT juga meningkatkan stabilitas termal serta ketahanan terhadap kerusakan akibat radiasi UV dan kelembaban. Penelitian ini diadaptasi untuk memperkuat struktur PLA dan meningkatkan daya tahan terhadap UV dan kelembaban. Dalam penelitian yang akan dilakukan, kebaruannya terletak pada penambahan bahan yaitu PEG dan ZnO untuk aplikasi

fotokatalis, yang belum pernah dilakukan pada studi sebelumnya.

Penelitian yang dilakukan oleh Bagheri et al. (2020) tentang fotokatalitik zat warna RB203 menggunakan nanopartikel ZnO yang distabilkan pada MWCNT fungsional. Hasil menunjukkan menunjukkan bahwa kombinasi ZnO nanopartikel dengan MWCNT yang telah difungsionalisasi menghasilkan efisiensi fotokatalisis tertinggi terhadap zat warna Reactive Blue 203, yaitu 99,1% pada pH 10, waktu 20 menit, dan intensitas UV 23 mW/cm². Dibandingkan, ZnO murni memiliki efisiensi degradasi sebesar 85,4% dan MWCNT hanya 19%. Hal ini menunjukkan bahwa keberadaan MWCNT meningkatkan stabilitas dan sebaran ZnO, serta menghambat rekombinasi pasangan elektron-lubang. Penelitian ini diadaptasi untuk memanfaatkan ZnO dan MWCNT sebagai fotokatalis aktif, dengan kebaruan berupa penambahan dan penggabungan polimer dalam fotokatalis tersebut.

Penelitian yang dilakukan oleh Sevastaki et al. (2021) sifat fotokatalitik nanostruktur ZnO ramah lingkungan pada perancah asam polilaktat cetak 3D. Hasil pengujian menunjukkan bahwa ZnO yang

disintesis dengan pelarut ouzo mampu mendegradasi paracetamol (50 ppm) hingga 95% dalam waktu 30 menit di bawah sinar UV. Adaptasi dari penelitian ini terletak pada pemanfaatan ZnO sebagai agen fotokatalis aktif yang disintesis secara ramah lingkungan dan dikombinasikan dengan substrat PLA untuk membentuk sistem fotokatalitik padat. Kebaruan yang dilakukan pada penelitian ini adalah dengan menggabungkan PLA dan ZnO dengan PEG dan MWCNT sebagai fotokatalis untuk degradasi zat warna *brilliant green*.

Penelitian yang dilakukan oleh Sheikhi et al. (2023) Pengaruh PEGylation terhadap sifat optik dan struktur nanostruktur ZnO untuk aplikasi fotokatalis dan fotodinamik. Degradasi maksimum yang dihasilkan dari aktivitas fotokatalitik metilen biru mencapai 83% pada kondisi asam (pH 5,4) dengan rasio PEG-ZnO 20:1. Dibandingkan ZnO murni, pegilasi meningkatkan efisiensi degradasi melalui peningkatan produksi *reactive oxygen species* (ROS) dan stabilitas koloid. Adaptasi dari penelitian ini adalah dengan memanfaatkan konsep penambahan PEG pada ZnO untuk meningkatkan kestabilan, ukuran partikel yang lebih kecil, dan aktivitas fotokatalitik. Kebaruan yang

dilakukan adalah dengan menambahkan PLA dan MWCNT untuk degradasi *brilliant green*.

Penelitian oleh Durmaz & Aytac (2021) mengevaluasi pengaruh dua jenis *plasticizer* berbasis poliol, yaitu PEG dan sorbitol (SOR), terhadap sifat mekanik, termal, dan permeabilitas dari film berbasis polyvinyl alcohol (PVA) dan casein (CA). Penambahan PEG hingga 25% menurunkan kekuatan tarik dari 38,8 MPa menjadi 24,7 MPa dan meningkatkan fleksibilitas (elongasi) secara signifikan. Adaptasi dari penelitian ini adalah penggunaan PEG sebagai *plasticizer* untuk meningkatkan fleksibilitas dan dispersi dalam matriks polimer. PEG diketahui mampu membentuk ikatan hidrogen dengan rantai polimer. Kebaruan penelitian Anda terletak pada formulasi komposit PLA/PEG/MWCNT/ZnO sebagai fotokatalis untuk degradasi *brilliant green*. Kombinasi ini mengintegrasikan kemampuan fleksibilitas dari PEG, konduktivitas dan luas permukaan MWCNT, serta aktivitas fotokatalitik ZnO, yang belum pernah dikombinasikan dalam artikel ini maupun dalam aplikasi terhadap pewarna tekstil.

C. Kerangka Berpikir

Bahan matriks yang digunakan adalah *poly lactic acid* (PLA), dan *polyethylene glycol* (PEG) sedangkan bahan filler yang digunakan yaitu fungsional *multi-walled carbon nanotubes* (MWCNT-COOH) dan *zinc oxide* (ZnO). PLA, PEG, MWCNT, dan ZnO dilarutkan menggunakan *chloroform*. Setelah itu, larutan tersebut di *casting* pada *petri dish* dan didiamkan selama 24 jam. Pembuatan larutan dilakukan sesuai dengan variasi komposisi yang sudah ditentukan. Pada tahap akhir lembar tipis dikarakterisasi menggunakan XRD untuk mengetahui struktur kristal, FTIR untuk mengetahui gugus fungsi yang ada pada sampel. Setelah itu, dilakukan fotokatalisis untuk mengetahui kandungan zat warna yang telah terserap oleh lembar tipis PLA/PEG/MWCNT/ZnO.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

A. Tempat dan Waktu Penelitian

Fabrikasi lembar tipis PLA/PEG/MWCNT/ ZnO dan pengujian fotokatalisis akan dilaksanakan di Pusat Riset Sistem Nanoteknologi Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) Serpong, Tangerang Selatan. Waktu penelitian pada 20 Oktober 2024 – 7 April 2025.

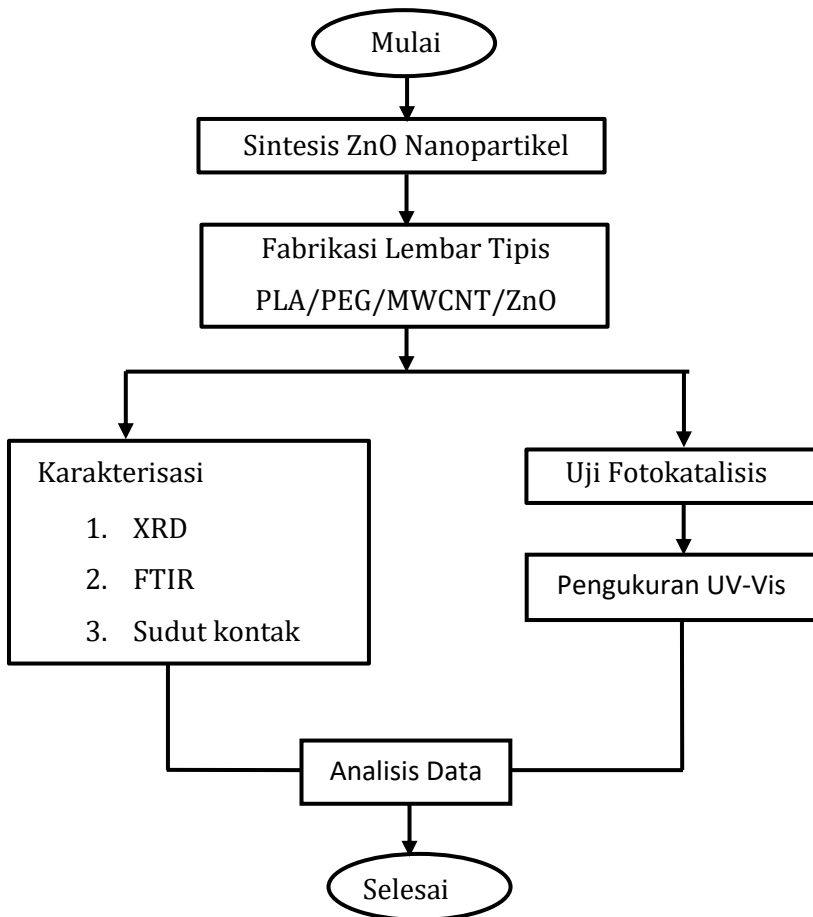
B. Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini diantaranya: peralatan gelas, cawan petri, timbangan digital, *Magnetic stirrer*, spatula, pipet mikro, parafilm, Sonikator, Lampu UV ($\lambda = 365\text{ nm}$), XRD (*X-Ray Diffraction*), FTIR (*Fourier Transform Infrared*), Sudut kontak (*Contact angle*), Spektrofotometer UV-Vis.

Sedangkan bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini sebagai berikut: *Zinc Acetate Dihydrate* ($\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (Merck), NaOH (Merck), *Polylactic Acid* (PLA), *Polyethylene Glycol* (PEG) (Merck), MWCNT-COOH, *Sodium Dodecyl Sulfate* (SDS), kloroform (CHCl_3) (Merck), akuades, zat warna *brilliant green* (BG), dan daun kelor (*Moringa oleifera*)

C. Prosedur Penelitian

Berikut adalah prosedur penelitian dalam Fabrikasi Lembar Tipis PLA/PEG/MWCNT/ZnO sebagai Fotokatalis Material untuk Degradasi Zat Warna *Brilliant Green*:



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

1. Pembuatan Ekstrak Daun Kelor

Pembuatan ekstrak daun kelor sebagai agen pereduksi pada proses sintesis ZnO. Sebanyak 10 gr daun kelor yang sudah dicuci, dimasukkan ke dalam gelas beker. Aquades sebanyak 100 mL kemudian ditambahkan ke dalam gelas beker dan dipanaskan pada suhu 90°C selama 1 jam. Setelah proses pemanasan selesai, larutan disaring untuk memperoleh ekstrak daun kelor.

2. Sintesis Seng Oksida (ZnO)

Sintesis ZnO dilakukan dengan menggunakan reduktor dari ekstrak daun kelor. *Zinc Acetate Dihydrate* ($\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 0,1 M dilarutkan ke dalam 100 mL akuades, kemudian diaduk menggunakan *magnetic stirrer* 300 rpm sampai homogen. Selanjutnya ditambahkan ekstrak daun kelor sebanyak 20 mL dan diaduk kembali pada suhu 70°C selama 10 menit. Setelah itu, larutan dibiarkan pada suhu ruang hingga dingin. Selanjutnya, larutan ditetesi dengan larutan NaOH 4 M hingga mencapai pH 12, lalu diaduk kembali selama 1 jam hingga terbentuk endapan berwarna putih. Endapan yang terbentuk kemudian disaring dan dicuci menggunakan aquades hingga pH

larutan netral (pH 7). Endapan kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu 100°C selama 24 jam, sehingga didapatkan serbuk seng oksida (Halida Ramadanti & Kartika Maharani, 2022).

3. Fabrikasi Lembar Tipis PLA/PEG/MWCNT/ZnO

Fabrikasi lembar tipis dilakukan dengan menggunakan teknik solution casting pada cawan petri yang terbuat dari kaca. Untuk lembar tipis PLA/MWCNT 1%, 1,5 gram PLA dilarutkan dalam 20 mL kloroform dan 15 mg MWCNT-COOH dalam 10 mL kloroform. Kedua larutan disonikasi, kemudian keduanya dicampur dan disonikasi kembali selama 25 menit, lalu ditambahkan kloroform hingga volume mencapai 30 mL. Campuran diaduk selama 10 menit, dicetak ke dalam cawan petri dan dikeringkan. Pada pembuatan lembar tipis PLA/PEG, masing-masing 750 mg PLA dan PEG dilarutkan dalam 20 mL kloroform, diawali dengan pengadukan PLA selama 30-60 menit, dilanjutkan dengan penambahan PEG dan dilanjutkan pengadukan selama 1 jam. Kloroform ditambahkan kembali jika terjadi penguapan, kemudian larutan dicetak dan dikeringkan selama 1 malam. Fabrikasi

PLA/PEG/MWCNT 1% dilakukan dengan metode serupa, menggunakan 750 mg PLA dan PEG, serta 15 mg MWCNT-COOH dan SDS (Sodium Dodecyl Sulfate). MWCNT-COOH disonikasi selama 10 menit, lalu ditambahkan SDS, kemudian disonikasi kembali selama 20 menit sebelum dicampurkan secara perlahan ke dalam larutan PLA/PEG yang telah diaduk selama 1 jam. Campuran akhir diaduk selama 1 jam dan disesuaikan volumenya sebelum dicetak. Pada sampel PLA/PEG/MWCNT 2,5%/ZnO 2,5%, digunakan 37,5 mg MWCNT-COOH dan ZnO yang masing-masing dilarutkan dalam 5 mL kloroform dan penambahan SDS sebanyak 40 mg. ZnO disonikasi selama 20-30 menit, kemudian dicampur ke dalam larutan PLA/PEG Bersama MWCNT-COOH secara perlahan dan diaduk selama 1 jam. Volume larutan disesuaikan sebelum proses pencetakan dan pengeringan. Prosedur yang sama diterapkan untuk komposisi PLA/PEG/MWCNT 1%/ZnO. MWCNT-COOH yang digunakan sebanyak 15 mg dan ZnO sebanyak 75 mg. Variasi komposisi bahan ditunjukkan pada Tabel 3.1.

Tabel 3. 1 Variasi Komposisi MWCNT-COOH, ZnO, PLA, dan PEG dalam %wt.

Sampel	MWCNT-COOH (mg)	ZnO (mg)	PEG (mg)	PLA (mg)
A	15,0	-	-	1.500
B	-	-	750	750
C	15,0	-	750	750
D	37,5	37,5	750	750
E	15,0	75,0	750	750

4. Karakterisasi

Lembar tipis yang telah di fabrikasi selanjutnya dikarakterisasi dengan menggunakan:

a. Karakterisasi XRD (*X-Ray Diffraction*)

Pengujian XRD (*X-Ray Diffraction*) berfungsi untuk mengetahui struktur kristal dan fasa pada sampel. *X-Ray Diffraction* (XRD) dilakukan dengan menggunakan instrumen XRD SMARTLAB RIGAKU (Cu-Source $\lambda = 0,154$ nm) (Gan et al., 2020). Pengujian dilakukan di Laboratorium Imaging Fisika Maju Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN).

b. Karakterisasi FTIR (*Fourier Transform Infrared Spectroscopy*)

Analisis FTIR dilakukan dengan tujuan mengidentifikasi gugus fungsi yang terkandung dalam sampel. Spektrum absorbansi didapatkan pada kisaran $4000\text{-}400\text{ cm}^{-1}$ (Younus et al., 2023). Pengujian FTIR dilakukan di Laboratorium Imaging Fisika Maju Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) dengan menggunakan Thermo Scientific Nicolet iS10.

c. Uji *Contact Angle* (Sudut Kontak)

Pengujian sudut kontak dilakukan dengan menggunakan alat *Dino-Lite Digital Microscope*. Penentuan sudut kontak dilakukan dengan menjatuhkan tetesan air Sampel dikontakkan dengan air yang terionisasi sebagai kontak antara cairan dengan sampel. Dilakukan pengukuran sebanyak 3 kali pada setiap sampelnya. Data hasil sudut kontak sampel lembar tipis diambil dari rata-rata 3 kali pengukuran tersebut.

1. Fotokatalisis

Dengan menggunakan lembar tipis PLA/PEG/MWCNT/ZnO sebagai katalis, penelitian ini bertujuan untuk mengurangi kadar zat warna *brilliant green* dalam larutan. Zat warna *brilliant green* akan mengalami degradasi molekul pada permukaan katalis sehingga konsentrasi zat warna dalam larutan akan berkurang. Langkah-langkah yang dilakukan dalam proses fotokatalisis meliputi:

a. Pembuatan Kurva Standar

Kurva standar *brilliant green* (BG) dibuat dari data absorbansi larutan BG pada konsentrasi 2 ppm, 4 ppm, 6 ppm, 8 ppm, 10 ppm, dan 15 ppm yang diukur pada panjang gelombang BG yaitu 624 nm. Selanjutnya, persamaan garis lurus dapat diperoleh dari persamaan 3.1.

$$y = ax + b \quad (3.1)$$

Dimana x adalah konsentrasi zat warna, y adalah absorbansi, a adalah kemiringan atau slope dari kurva standar, dan b adalah intersep atau perpotongan terhadap sumbu y (Fulanjari, 2022).

b. Fotolisis Larutan Brilliant Green

Sebelum proses fotokatalisis dilakukan, terlebih dahulu dilakukan proses fotolisis untuk mengetahui degradasi *brilliant green* (BG) tanpa katalis dengan penyinaran lampu UV. Proses fotolisis ini bertujuan untuk membedakan pengaruh sinar UV secara langsung terhadap degradasi senyawa dengan degradasi yang melibatkan peran katalis.

c. Uji Aktivitas Fotokatalis

Aktivitas fotokatalitik dari katalis terhadap degradasi *brilliant green* (BG) dilakukan melalui beberapa tahapan. Sebanyak 50 mL larutan BG dengan konsentrasi 15 ppm dimasukkan ke dalam gelas beker, kemudian ditambahkan masing-masing satu lembar tipis katalis berukuran 2x2 cm.

Selanjutnya, untuk proses fotokatalisis, sampel terlebih dahulu dibiarkan dalam kondisi gelap selama 30 menit. Tahap ini bertujuan untuk mencapai kondisi kesetimbangan adsorpsi/desorpsi (Hasan et al., 2024). Setelah itu, sampel disinari menggunakan lampu UV dengan panjang

gelombang 365 nm selama 180 menit untuk memulai proses fotokatalitik.

Dalam penelitian ini dilakukan pengujian fotokatalisis untuk mengetahui efek waktu kontak, dengan rentang waktu 0, 5, 10, 15, 20, 30, 60, 90, 120, 150, dan 180 menit. Selain itu, diamati pula efek dari jumlah fotokatalis yang digunakan, yaitu dua lembar katalis berukuran masing-masing 2x2 cm. Pengujian fotokatalisis juga dilakukan untuk mengetahui pengaruh pH larutan, dengan kondisi pH yang digunakan mencakup kondisi asam (pH 3), netral (pH 5), dan basa (pH 9).

Pada setiap interval waktu, larutan pewarna diambil dan dilakukan pengukuran absorbansi menggunakan spektrofotometer UV-Vis. Selanjutnya persentase efisiensi degradasi BG dihitung menggunakan persamaan 3.2.

$$\text{Efisiensi Degradasi (\%)} = \frac{C_o - C_t}{C_o} \times 100 \quad (3.2)$$

Dimana C_o adalah konsentrasi awal dan C_t adalah konsentrasi pada waktu t selama reaksi (Adam et al., 2021).

d. Kinetika Reaksi

Untuk memahami proses fotokatalitik secara lebih mendalam, nilai konstanta laju reaksi (k) terhadap proses degradasi *brilliant green* (BG) dihitung pada setiap percobaan dengan menggunakan model kinetika semu orde satu. Pendekatan ini digunakan untuk memahami dinamika degradasi serta mengukur efektivitas fotokatalis yang digunakan dalam proses fotokatalisis.

Persamaan kinetika semu orde satu sebagai berikut:

$$-\ln \frac{C_t}{C_o} = k \cdot t \quad (3.3)$$

Dimana C_o dan C_t adalah konsentrasi awal dan konsentrasi pada waktu t , k adalah konstanta laju reaksi dan t waktu kontak (Arun et al., 2025).

e. Kinetika Adsorpsi

Untuk penentuan sistem adsorpsi, sangat penting untuk mempelajari kinetika adsorpsi, yang dapat digunakan untuk memprediksi laju penghilangan polutan, untuk menetapkan ketergantungan waktu dari sisa adsorbat

dalam larutan, dan untuk mengungkap mekanisme yang terlibat dalam proses adsorpsi. Berbagai jenis model kinetik telah diterapkan untuk menggambarkan kinetika adsorpsi, misalnya, model pseudo-first order (PFO), model pseudo-second order (PSO) (X. Guo & Wang, 2019).

Persamaan model PFO Persamaan (3.4) dan model PSO Persamaan (3.5) dapat ditulis ulang sebagai berikut [22]:

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 \cdot t \quad (3.4)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 \cdot q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (3.5)$$

q_e adalah jumlah adsorbat yang teradsorpsi pada kesetimbangan, q_t jumlah adsorbat yang teradsorpsi pada waktu t , k adalah konstanta laju adsorpsi, dan t adalah waktu (X. Guo & Wang, 2019).

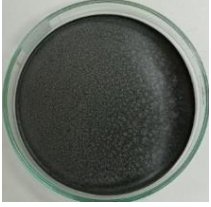
BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Fabrikasi Lembar Tipis

Lembar tipis berbasis PLA/PEG/MWCNT/ZnO sebagai fotokatalis material untuk degradasi zat warna *brilliant green* telah berhasil di fabrikasi dengan menggunakan metode *solution casting*. Hasil fabrikasi dari masing-masing lembar tipis dapat dilihat pada Gambar 4.1.

Gambar 4.1 sampel A menunjukkan lembar tipis PLA/MWCNT 1% yang tampak berwarna hitam pekat. Warna hitam yang terlihat merata mengindikasikan bahwa penyebaran MWCNT-COOH yang cukup merata dalam matriks PLA. Namun, terlihat adanya beberapa bagian permukaan tampak adanya gumpalan kecil, yang berasal dari aglomerasi partikel MWCNT-COOH akibat dispersi yang kurang sempurna selama proses pencampuran. Warna hitam pekat yang dihasilkan juga menunjukkan bahwa konsentrasi MWCNT-COOH dalam komposit cukup tinggi.

Sampel	Hasil Lembar Tipis
A (PLA/MWCNT 1%)	
B (PLA/PEG)	
C (PLA/PEG/MWCNT 1%)	
D (PLA/PEG/MWCNT 2,5%/ZnO 2,5%)	
E (PLA/PEG/MWCNT 1%/ZnO 5%)	

Gambar 4. 1 Hasil Fabrikasi dari Lembar Tipis

Gambar 4.1 sampel B menunjukkan lembar tipis PLA/PEG yang tampak berwarna putih buram dengan permukaan yang halus dan seragam. Warna putih buram ini mengindikasikan terjadinya perubahan struktur internal akibat interaksi antara rantai polimer PLA dan PEG, yang menyebabkan penurunan kristalinitas PLA. Permukaan yang rata dan tidak terdapat aglomerasi menunjukkan bahwa PEG dapat terdispersi dengan baik di dalam matriks PLA. Hasil ini menunjukkan bahwa PEG berperan efektif dalam meningkatkan homogenitas dan fleksibilitas material komposit berbasis PLA (W. Guo et al., 2025).

Hasil lembar tipis PLA/PEG/MWCNT 1% ditunjukkan pada Gambar 4.1 sampel C. Warna hitam keabu-abuan yang merata pada seluruh permukaan menunjukkan adanya distribusi MWCNT-COOH yang cukup baik dalam matriks PLA. Namun, masih terlihat adanya pola bercak-bercak halus yang mengindikasikan keberadaan aglomerasi sebagian MWCNT-COOH dan PEG akibat pencampuran yang belum sepenuhnya homogen. Struktur permukaan yang relatif homogen menandakan bahwa proses pencampuran dan pemrosesan telah berlangsung

cukup efektif, meskipun masih dapat ditingkatkan untuk mendapatkan dispersi yang lebih sempurna.

Gambar 4.1 sampel D menunjukkan hasil lembar tipis PLA/PEG/MWCNT 2,5%/ZnO 2,5%. Permukaan lembar tipis berwarna hitam pekat dengan tekstur yang relatif homogen. Warna gelap yang dominan menandakan keberadaan MWCNT-COOH dalam jumlah yang signifikan, serta menunjukkan distribusi yang cukup merata dalam matriks PLA/PEG. Sementara itu, partikel ZnO yang berwarna putih kemungkinan terdispersi secara seragam. Permukaan yang halus dan tidak menunjukkan aglomerasi besar menunjukkan bahwa proses pencampuran berjalan cukup efektif. Meskipun PEG ditambahkan sebagai plasticizer untuk meningkatkan fleksibilitas matriks PLA, namun lembar tipis yang dihasilkan menunjukkan sifat yang mudah retak dan kurang elastis. Hal ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor antara lain, konsentrasi MWCNT dan ZnO yang cukup tinggi sehingga dapat meningkatkan kekakuan material, interaksi antara PEG dan filler yang mungkin dapat mengganggu fleksibilitas matriks, serta kemungkinan pengaruh dari pemrosesan seperti suhu dan waktu pencampuran yang belum optimal. Gambar

4.1 sampel E menunjukkan hasil lembar tipis dari PLA/PEG/MWCNT 1%/ZnO 5%. Secara visual, permukaan lembar tipis tampak hitam pekat dengan tampilan yang relatif homogen. Warna dominan hitam menunjukkan keberadaan MWCNT-COOH dalam matriks, meskipun pada konsentrasi yang lebih rendah dibandingkan sampel sebelumnya. Sementara itu, ZnO yang berwarna putih cenderung tidak tampak secara visual karena tertutupi oleh warna gelap dari MWCNT, namun diperkirakan telah terdispersi cukup baik dalam matriks polimer. Berbeda dengan lembar tipis PLA/PEG/MWCNT 2,5%/ZnO 2,5% yang memiliki sifat cenderung kaku dan mudah retak, lembar tipis PLA/PEG/MWCNT 1%/ZnO 5% menunjukkan karakteristik yang lebih elastis dan lentur. Hal ini mengindikasikan adanya sinergi komposisi yang lebih seimbang antara filler dan plasticizer dalam struktur komposit.

Konsentrasi MWCNT-COOH yang lebih rendah meningkatkan fleksibilitas karena mengurangi kekakuan dan risiko aglomerasi. PEG dapat berinteraksi lebih optimal dengan matriks PLA, sehingga meningkatkan elastisitas material. Penambahan ZnO sebesar 5% turut memperkuat

struktur dan menjaga kestabilan mekanik tanpa mengurangi fleksibilitas, karena penyebarannya yang baik membantu meratakan tegangan dan mencegah retakan. Dengan demikian, lembar tipis PLA/PEG/MWCNT 1%/ZnO 5% memiliki morfologi permukaan yang baik dan sifat mekanik yang lebih seimbang, khususnya dalam hal elastisitas, dibandingkan formulasi dengan konsentrasi MWCNT yang lebih tinggi.

B. Karakterisasi XRD (*X-Ray Diffraction*) Lembaran Tipis

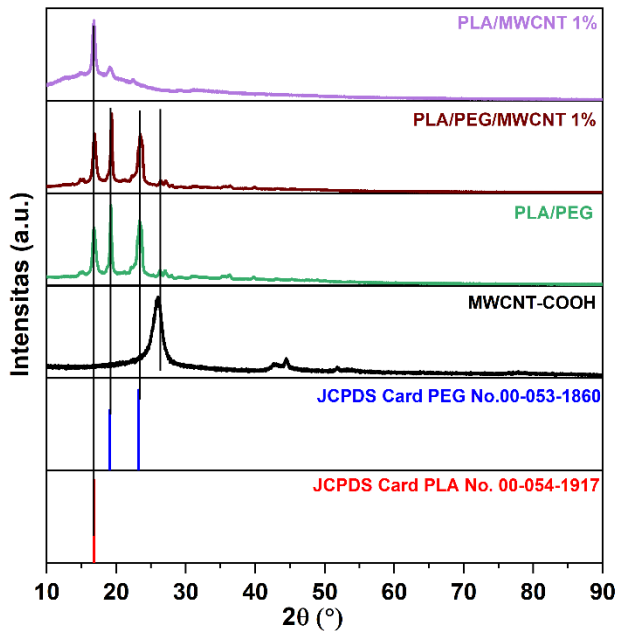
Hasil analisis XRD pada Gambar 4.2 menunjukkan bahwa sampel PLA/PEG memiliki tiga puncak tajam pada $2\theta = 16,7^\circ$, $19,1^\circ$, dan $22,4^\circ$. Puncak $16,7^\circ$ berasal dari kristal PLA bidang (110), sedangkan puncak $19,1^\circ$ dan $22,4^\circ$ berasal dari kristal PEG bidang (115) dan (016). PEG memiliki struktur monoklinik dan berfungsi sebagai *plasticizer* yang meningkatkan mobilitas rantai PLA, sehingga memperbaiki kristalinitasnya (Benkraled et al., 2024). Selain itu, muncul puncak kecil pada $2\theta = 26,2^\circ$, yang diduga berasal dari fase kristalin minor PEG. PEG dengan berat molekul tinggi, seperti PEG 4000, dapat menunjukkan puncak tambahan di sekitar 26° ,

meskipun puncak utamanya berada di $19,1^\circ$ dan $23,3^\circ$, seperti pada penelitian Tan et al. (2016). Interaksi antara rantai PLA dan PEG, disertai dengan kontribusi fase amorf dari PLA, kemungkinan menyebabkan kemunculan atau penguatan puncak pada $2\theta = 26,2^\circ$. Dengan demikian, puncak tersebut tidak berasal dari MWCNT, melainkan lebih mungkin terkait dengan kristal PEG atau efek sinergis dari struktur komposit PLA/PEG (R. Li et al., 2020).

Pola difraksi XRD pada sampel PLA/MWCNT 1% menunjukkan dua puncak utama pada $2\theta = 16,7^\circ$ dan $19,1^\circ$, yang berasal dari fase kristalin PLA. Keberadaan puncak ini mengindikasikan bahwa PLA masih mempertahankan struktur kristal α' (*pseudo-orthorhombic*) yang umum terbentuk pada kondisi pendinginan cepat atau semi-kristalin (Younus et al., 2023). Puncak khas MWCNT di sekitar 26° tidak terdeteksi. Penurunan intensitas ini dikaitkan dengan konversi ke struktur amorf akibat modifikasi permukaan dan dispersi yang homogen, menjadikan puncaknya tertutup oleh sinyal amorf PLA (Kotsilkova et al., 2020).

Sampel PLA/PEG/MWCNT 1% menunjukkan tiga puncak utama pada $2\theta = 16,7^\circ$, $19,1^\circ$, dan $22,4^\circ$,

yang merupakan ciri khas dari struktur kristalin PLA dan PEG. Penambahan PEG berperan dalam meningkatkan kristalinitas sistem (Greco et al., 2019). Puncak lemah pada $2\theta \approx 26^\circ$, yang tampak jelas pada MWCNT-COOH murni, merupakan puncak difraksi bidang (002) dari struktur grafitik karbon dan menjadi ciri khas MWCNT yang memiliki struktur kristal heksagonal (Awadallah-F & Al-Muhtaseb, 2020; Younus et al., 2023). Namun, pada sampel PLA/PEG/MWCNT 1%, puncak ini tidak tampak dominan. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh rendahnya konsentrasi MWCNT (1%) dan dispersi yang baik dalam matriks, sehingga intensitas puncaknya sangat lemah atau tertutup oleh latar belakang amorf (Kotsilkova et al., 2020).



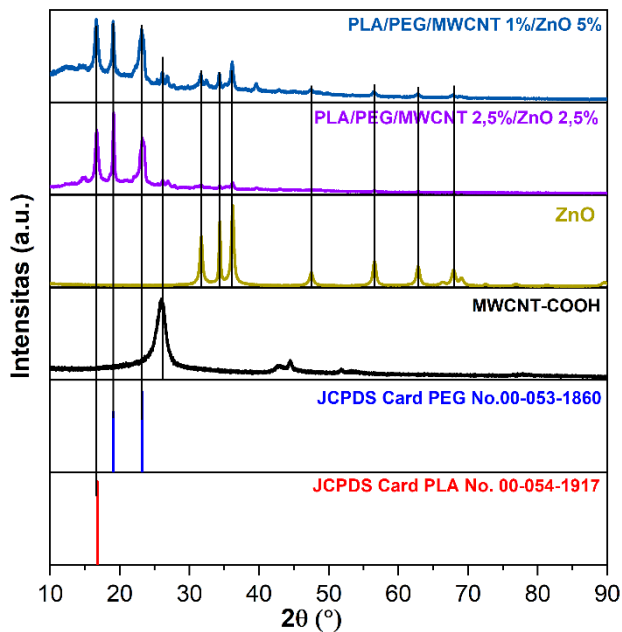
Gambar 4. 2 Pola XRD dari Lembar Tipis Tanpa Penambahan ZnO

Gambar 4.3 menunjukkan hasil XRD lembar tipis dengan penambahan ZnO. Sampel PLA/PEG/MWCNT 2,5%/ZnO 2,5% menampilkan kombinasi puncak karakteristik dari PLA, PEG, dan ZnO. Puncak utama PLA terletak pada $2\theta = 16,7^\circ$, yang menunjukkan struktur kristalin α' -PLA berdasarkan JCPDS No. 00-054-1917. Puncak PEG muncul pada $2\theta = 19,1^\circ$ dan $23,3^\circ$, sesuai dengan struktur kristal monoklinik PEG (JCPDS No. 00-053-1860). Puncak baru yang tajam tampak pada $2\theta = 31,7^\circ, 34,4^\circ, 36,2^\circ, 47,5^\circ$, dan $56,6^\circ$,

yang mengacu pada bidang (100), (002), (101), (102), dan (110) dari struktur kristal ZnO wurtzite (JCPDS No. 36-1451). Hal ini menunjukkan bahwa ZnO terdispersi baik dan hadir dalam bentuk kristalin tinggi, meskipun hanya ditambahkan sebesar 2,5% (S. A. Khan et al., 2021). Sementara itu, puncak khas MWCNT pada $2\theta = 26^\circ$ bidang (002) tidak tampak jelas. Ketidakhadirannya kemungkinan disebabkan oleh konsentrasi MWCNT yang rendah dan dispersi yang merata dalam matriks, sehingga tidak membentuk kristal besar yang mampu menghasilkan puncak difraksi tajam (Kotsilkova et al., 2020; Younus et al., 2023).

Pada sampel PLA/PEG/MWCNT 1%/ZnO 5%, puncak difraksi ZnO tampak lebih dominan, terutama pada $2\theta = 31,7^\circ$, $34,4^\circ$, dan $36,2^\circ$, yang menunjukkan peningkatan jumlah dan kristalinitas ZnO akibat penambahan konsentrasi hingga 5%. Puncak PLA dan PEG pada $2\theta = 16,7^\circ$ dan $19,1^\circ$ masih terlihat, menandakan bahwa kristalinitas keduanya tidak terganggu secara signifikan. Namun, intensitas puncak PEG pada $23,3^\circ$ mengalami penurunan dibandingkan komposit sebelumnya. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh dominasi fase ZnO yang menutupi

sinyal PEG atau interaksi antara ZnO dan PEG yang menghambat kristalisasi PEG (Hammani et al., 2022). Seperti pada sampel sebelumnya, puncak khas MWCNT di sekitar $2\theta = 26^\circ$ tidak terdeteksi. Hal ini mengindikasikan bahwa MWCNT tersebar dengan baik dalam matriks atau berada dalam bentuk semi-amorf, sehingga tidak menghasilkan puncak difraksi yang jelas (Farag & Abdel-Fattah, 2023).



Gambar 4. 3 Pola XRD dari Lembar Tipis dengan Penambahan ZnO

Berdasarkan data XRD juga dapat diketahui nilai dari jarak antar bidang (d) PLA, PEG, ZnO, ukuran kristal (D), dan persentase kristalin (X_c) dari hasil masing-masing lembar tipis. Jarak antar bidang (d) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.1. Ukuran kristal (D) dari PLA, PEG, MWCNT, dan ZnO dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.2. Persentase kristalin (X_c) dapat dihitung menggunakan persamaan 2.3. Berdasarkan persamaan-persamaan tersebut dihasilkan nilai rata-rata dari masing-masing sampel dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Hasil Perhitungan Rata-rata dari Setiap Sampel Lembar Tipis

Sampel	d (Å)	D (nm)	X_c (%)
PLA/MWCNT 1%	4,9	8,2	24,8
PLA/PEG	4,2	17,4	37,2
PLA/PEG/MWCNT 1%	4,2	18,9	41,9
PLA/PEG/MWCNT 2,5%/ZnO 2,5%	3,5	20,8	45,3
PLA/PEG/MWCNT 1%/ZnO 5%	2,9	15,5	38,6

Berdasarkan Tabel 4.1, sampel PLA/MWCNT 1% memiliki nilai (d) tertinggi yaitu sebesar 4,9 Å. Peningkatan ini diduga disebabkan oleh adanya gangguan atau penyisipan struktur nanotube ke dalam

susunan kristal PLA (Younus et al., 2023). Sebaliknya, sampel PLA/PEG dan PLA/PEG/MWCNT 1% menunjukkan nilai (d) yang lebih kecil yaitu 4,2 Å. Hal ini mengindikasikan bahwa penambahan PEG cenderung mempertahankan keteraturan struktur kristal PLA, sesuai dengan penelitian Batakliiev et al. (2019). PEG berperan sebagai *plasticizer* yang tidak secara signifikan mengganggu susunan kristal PLA (Jiang et al., 2019). Secara umum, nilai jarak antar bidang (d) pada masing-masing lembar tipis menurun seiring penambahan komponen, khususnya ZnO. Penurunan ini menunjukkan susunan atom yang semakin rapat, sesuai dengan sifat kristalin ZnO yang berstruktur heksagonal *wurtzite* (Moezzi et al., 2025). Namun, pada konsentrasi ZnO yang tinggi, penurunan jarak antar bidang tidak sepenuhnya mencerminkan peningkatan kualitas struktur, melainkan dapat disebabkan oleh aglomerasi partikel ZnO yang memadatkan daerah lokal secara merata (Kumar N.b. et al., 2015). Selain ZnO, penurunan jarak antar bidang PLA juga dipengaruhi oleh keberadaan PEG. PEG yang bersifat semi-kristalin dapat mengganggu keteraturan rantai PLA serta berperan sebagai agen nukleasi, sehingga mempercepat kristalinitas dan memperkecil

jarak antar bidang kristal (W. Guo et al., 2025; F. J. Li et al., 2015).

Berdasarkan perhitungan menggunakan persamaan Debye-Scherrer, rata-rata ukuran kristal pada sampel tanpa penambahan ZnO menunjukkan variasi yang dipengaruhi oleh komposisi bahan. Sampel PLA/PEG memiliki ukuran kristal sebesar 17,4 nm lebih tinggi dari PLA/MWCNT 1% yang hanya sebesar 8,2 nm. Penurunan ini menunjukkan bahwa MWCNT dapat menghambat pertumbuhan kristal PLA akibat gangguan struktural yang ditimbulkan (Younus et al., 2023). Namun, pada PLA/PEG/MWCNT 1% ukuran kristal meningkat menjadi 18,9 nm. Hal ini mengindikasikan bahwa PEG mampu memperbaiki mobilitas rantai PLA yang terganggu oleh MWCNT, sehingga pertumbuhan kristal tetap optimal (Fitroh et al., 2024; Karimi et al., 2022). Rata-rata nilai ukuran kristal (D) dari masing-masing lembar tipis yang dihitung menggunakan persamaan Debye-Scherrer mengalami peningkatan seiring penambahan ZnO (M. Khan et al., 2024). Sampel PLA/PEG/MWCNT 2,5%/ZnO 2,5% memiliki ukuran kristal terbesar yaitu 20,8 nm. Hal ini sesuai dengan penelitian Bagheri et al, (2020) yang menyatakan bahwa penambahan ZnO

dapat meningkatkan ukuran kristal akibat pertumbuhan kristal yang lebih stabil. Namun pada sampel PLA/PEG/MWCNT 1%/ZnO 5% ukuran kristal menurun menjadi 15,5 nm karena penambahan ZnO sebesar 5% membuat banyak titik awal pembentukan kristal, tetapi justru menghambat pertumbuhannya. Hal ini menyebabkan kristal yang terbentuk berukuran lebih kecil (Tian et al., 2025; Varudkar et al., 2020). Konsentrasi ZnO yang tinggi berpotensi menyebabkan aglomerasi dan mengganggu keteraturan rantai polimer, sehingga kristal yang terbentuk menjadi lebih kecil akibat terbatasnya ruang tumbuh dan mobilitas rantai selama kristalisasi (Mallakpour & Behranvand, 2017).

Derajat kristalinitas (X_c) dari masing-masing lembar tipis juga meningkat seiring penambahan filler. Kristalinitas terendah terlihat pada PLA/MWCNT 1% yaitu 24,8%, yang menunjukkan bahwa penambahan MWCNT tanpa senyawa lain cenderung mengganggu keteraturan kristal PLA, kemungkinan akibat interaksi fisik antara permukaan nanotube dengan matriks (Younus et al., 2023). Pada PLA/PEG menunjukkan peningkatan kristalinitas menjadi 37,2%, yang mengindikasikan bahwa PEG berperan sebagai

plasticizer yang meningkatkan fleksibilitas rantai PLA dan mendukung pembentukan kristal yang lebih teratur (Phuangthong et al., 2024). Kombinasi ketiganya pada PLA/PEG/MWCNT 1% menghasilkan kristalinitas sebesar 41,9%, yang mencerminkan adanya sinergi antara efek pelenturan dari PEG dan penyebaran MWCNT yang lebih merata, sehingga mengurangi gangguan terhadap struktur kristal PLA (Fitroh et al., 2024; S. Wang et al., 2021). Puncak kristalinitas tertinggi dicapai pada sampel PLA/PEG/MWCNT 2,5%/ZnO 2,5% yaitu sebesar 45,3%. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan ZnO dalam konsentrasi moderat dapat berperan sebagai agen nukleasi yang mempercepat pertumbuhan kristal PLA secara lebih terarah (Tang et al., 2020). Namun, pada konsentrasi ZnO yang lebih tinggi seperti pada sampel PLA/PEG/MWCNT 1%/ZnO 5%, nilai kristalinitas menurun menjadi 38,6%. Penurunan ini kemungkinan disebabkan oleh aglomerasi partikel ZnO yang menghambat pertumbuhan kristal dan mengganggu keteraturan struktur polimer (Kim et al., 2019). Peningkatan kristalinitas ini mendukung kinerja fotokatalis, karena material yang lebih kristalin memiliki lebih sedikit cacat kristal, sehingga dapat

mengurangi rekombinasi pasangan elektron-lubang (Fu et al., 2023).

C. Karakterisasi FTIR (*Fourier Transform Infrared Spectroscopy*)

Spektrum FTIR dari masing-masing lembar tipis ditampilkan pada Gambar 4.4. Sampel PLA/PEG menunjukkan vibrasi ulur dari gugus karbonil (C=O) dari PLA pada bilangan gelombang 1750 cm^{-1} , serta vibrasi ulur dari gugus C-O di kisaran bilangan gelombang $1180\text{-}1080\text{ cm}^{-1}$ yang merupakan ciri gugus ester (Moldovan et al., 2025; Peponi et al., 2020). Selain itu, vibrasi ulur gugus C-H dari gugus metil dan metilena tampak pada bilangan gelombang 2945 dan 2995 cm^{-1} . Peningkatan intensitas gugus C-O juga mendukung keberadaan rantai eter dari PEG (Erdem et al., 2025; GungorErtugral et al., 2024). Spektrum ini mengindikasikan keberhasilan pencampuran PLA dan PEG tanpa pembentukan gugus baru, serta menandakan adanya interaksi fisik antara gugus polar PLA dan PEG.

Pada PLA/MWCNT 1%, gugus-gugus utama PLA seperti gugus C=O pada bilangan gelombang 1750 cm^{-1} dan gugus C-H pada bilangan gelombang $2945\text{-}2995\text{ cm}^{-1}$. Seperti halnya yang dilaporkan dalam penelitian

yang dilakukan oleh da Silva et al, (2025), Zahedah & Dinç, (2025), meskipun tidak terdapat gugus baru yang terbentuk, penurunan intensitas pada gugus C=O dan C-H pada spektrum menunjukkan adanya interaksi fisik antara permukaan MWCNT dan gugus fungsional PLA. Interaksi ini bersifat non-kovalen, kemungkinan melalui ikatan hidrogen atau interaksi $\pi - \pi$ dan tidak mengubah struktur kimia utama PLA (Younus et al., 2023).

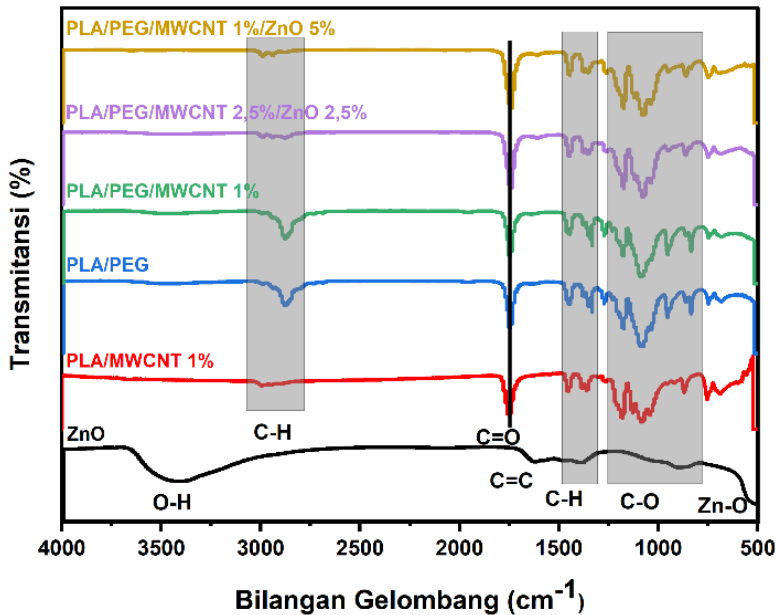
Sampel PLA/PEG/MWCNT 1% menunjukkan karakteristik dari ketiga komponen. Gugus C=O tetap terdeteksi pada bilangan gelombang sekitar 1750 cm^{-1} , meskipun mengalami sedikit pergeseran yang lebih kompleks. Selain itu, intensitas gugus C-O pada bilangan gelombang $1100\text{-}1000\text{ cm}^{-1}$ tampak meningkat, yang menunjukkan kontribusi dari interaksi antara PEG dan MWCNT. Kombinasi PEG sebagai matriks pendispersi dan MWCNT sebagai bahan pengisi konduktif diduga mampu memperkuat karakteristik kimia permukaan tanpa mengganggu struktur dasar dari PLA (Ahmad et al., 2020; S. Wang et al., 2021).

Pada PLA/PEG/MWCNT 2,5%/ZnO 2,5%, menunjukkan ciri khas tambahan dari ZnO. Pada gugus

C-H yang bergeser ke bilangan gelombang 2995 cm^{-1} dan gugus C=O yang bergeser ke bilangan gelombang 1747 cm^{-1} , yang menunjukkan interaksi antara gugus karbonil PLA dengan permukaan ZnO. Hal ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Yang et al, (2023). Gugus C-O juga mengalami perubahan dalam intensitas. Selain itu, teramati pita Zn-O yang muncul pada bilangan gelombang $500\text{-}600\text{ cm}^{-1}$, mengindikasikan keberhasilan penyatuan ZnO ke dalam matriks dan terjadinya interaksi dengan komponen organik (Chong et al., 2024).

Pada PLA/PEG/MWCNT 1%/ZnO 5%, pita Zn-O tampak jauh lebih tajam pada bilangan gelombang $500\text{-}600\text{ cm}^{-1}$, yang menunjukkan bahwa kontribusi ZnO terhadap spektrum semakin meningkat seiring dengan bertambahnya konsentrasi ZnO dalam matriks (Moezzi et al., 2025). Pola spektrum ini menyerupai karakteristik ZnO murni dan mengindikasikan bahwa ZnO telah terdistribusi dengan baik di dalam matriks komposit. Sementara itu, intensitas gugus organik seperti C=O dan C-O tampak menurun atau sebagian tertutupi oleh dominasi sinyal dari ZnO. Hal ini memperkuat dugaan bahwa ZnO mendominasi interaksi vibrasi dalam sistem dan turut menyebabkan

pergeseran posisi serta perubahan intensitas gugus-gugus fungsional lainnya (Goncharova et al., 2021; Tang et al., 2020).



Gambar 4. 4 Spektrum FTIR dari ZnO dan Lembar Tipis

D. Uji Sudut Kontak (*Contact angle*)

Hasil pengukuran sudut kontak pada masing-masing lembar tipis ditampilkan pada Gambar 4.5, sedangkan nilai sudut kontak untuk setiap sampel disajikan pada Tabel 4.2. Berdasarkan Tabel 4.2, penambahan PEG dan MWCNT menyebabkan penurunan sudut kontak, dengan nilai terendah terdapat pada sampel PLA/PEG/MWCNT 1% sebesar

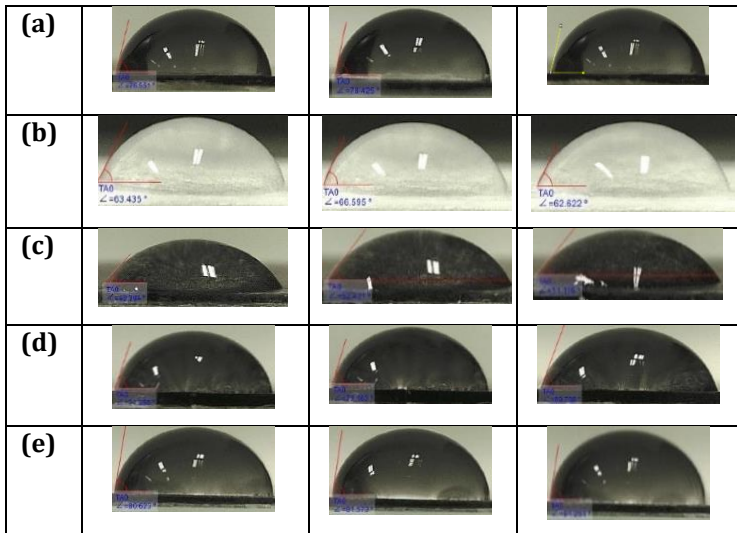
51,2°, yang menunjukkan sifat lebih hidrofilik. Penurunan sudut kontak ini disebabkan oleh keberadaan gugus hidroksil polar pada PEG, yang dapat membentuk ikatan hidrogen dengan molekul air (Durmaz & Aytac, 2021). Penelitian Guo et al. (2025) juga menunjukkan bahwa dalam kerangka PLA/PEG, sudut kontak air menurun seiring meningkatnya kandungan PEG, yang menunjukkan peningkatan hidrofilisitas. Hal ini terutama disebabkan oleh sifat hidrofilik PEG yang tinggi akibat banyaknya gugus -OH, yang memungkinkan pembentukan ikatan hidrogen dengan air. Selain itu, sifat hidrofilik MWCNT-COOH turut memperbesar interaksi material dengan air (Handayani et al., 2022). Sifat hidrofilik ini penting karena dapat meningkatkan luas permukaan efektif antara material fotokatalis dan larutan *brilliant green*. Semakin hidrofilik permukaan material, semakin luas area kontakannya dengan larutan, sehingga mempercepat transfer polutan menuju situs aktif fotokatalis (Arat & Akyildiz, 2024).

Sebaliknya, penambahan ZnO meningkatkan nilai sudut kontak, seperti yang terlihat pada sampel PLA/PEG/MWCNT 1%/ZnO 5% dengan rata-rata sudut kontak 81,1°. Meskipun lebih tinggi

dibandingkan sampel sebelumnya, nilai ini masih berada di bawah 90° , sehingga sampel tetap tergolong hidrofilik. Penurunan tingkat hidrofilisitas dapat berdampak pada berkurangnya luas permukaan efektif (Fathanah et al., 2021), namun keberadaan ZnO yang bersifat kristalin tetap berperan penting dalam mendukung pembentukan radikal aktif, sehingga proses fotokatalisis tetap berlangsung (Doumeng et al., 2021).

Tabel 4. 2 Hasil Pengukuran Uji Sudut Kontak Lembar Tipis

Lembar Tipis	Pengukuran ke-			Rata-rata
	Ke-1	Ke-2	Ke-3	
PLA/MWCNT 1%	76,5	78,4	78,6	77,8
PLA/PEG	63,4	66,5	62,6	64,2
PLA/PEG/MWCNT 1%	49,3	52,4	51,9	51,2
PLA/PEG/MWCNT 2,5%/ZnO 2,5%	71,3	73,1	69,7	71,4
PLA/PEG/MWCNT 1%/ZnO 5%	80,6	81,5	81,2	81,1



Gambar 4. 5 Gambar Uji Sudut Kontak Lembar Tipis (a) PLA/MWCNT 1%, (b) PLA/PEG, (c) PLA/PEG/MWCNT 1%, (d) PLA/PEG/MWCNT 2,5%/ZnO 2,5%, (e) PLA/PEG/MWCNT 1%/ZnO 5%

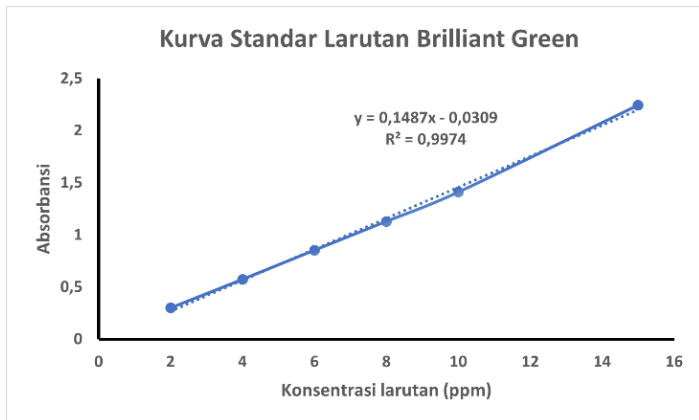
E. Fotokatalisis

Pengujian sampel lembar tipis yang telah di fabrikasi sebagai fotokatalis dilakukan pada zat warna brilliant green dengan konsentrasi 15 ppm dalam volume larutan sebanyak 15 mL untuk setiap pengujian.

a. Pembuatan Kurva Standar Larutan brilliant green (BG)

Kurva standar larutan BG pada Gambar 4.6 menunjukkan hubungan linier antara konsentrasi larutan BG dan nilai absorbansi. Nilai R^2 yang

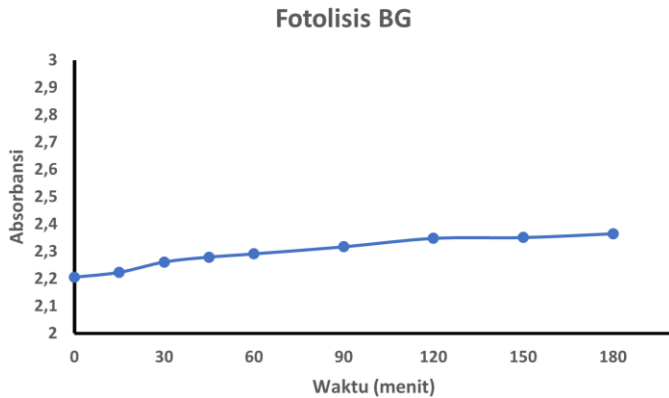
mendekati 1 menunjukkan korelasi yang kuat dan linieritas yang sangat baik antara variabel, sesuai dengan prinsip hukum Lambert-Beer, yang menyatakan bahwa absorbansi sebanding dengan konsentrasi (Delgado, 2022). Kurva ini berfungsi sebagai acuan kuantitatif untuk menghitung konsentrasi sisa BG setelah proses fotokatalis oleh komposit PLA/PEG/MWCNT/ZnO. Penelitian serupa oleh Peter et al. (2019) menggunakan kurva standar BG dengan nilai R^2 yang juga mendekati 1, menunjukkan bahwa hubungan linier tersebut valid dan dapat digunakan untuk mengevaluasi efisiensi fotokatalis dalam proses degradasi pewarna.



Gambar 4. 6 Kurva Standar Larutan BG

b. Fotolisis Larutan brilliant green (BG)

Grafik fotolisis larutan BG dapat dilihat pada Gambar 4.6. Berdasarkan Gambar 4.7, menunjukkan bahwa nilai absorbansi meningkat sedikit. Hal ini menandakan bahwa tanpa kehadiran fotokatalis, cahaya saja tidak cukup untuk mendegradasi BG secara signifikan. Peningkatan absorbansi kemungkinan disebabkan oleh penguapan pelarut atau perubahan spesifik ionik BG. Hal ini konsisten dengan penelitian Marcus et al. (2022), Matussin et al. (2024), yang menunjukkan bahwa pewarna seperti BG bersifat stabil terhadap fotolisis langsung dan memerlukan fotokatalis untuk mempercepat proses degradasi. Terlihat tidak terjadi perubahan absorbansi yang signifikan pada larutan BG. Hal ini menunjukkan bahwa penyinaran dengan lampu UV tidak berpengaruh terhadap perubahan konsentrasi BG. Dengan demikian, larutan BG pada konsentrasi tersebut dapat digunakan sebagai sampel uji dalam proses fotokatalisis hingga waktu 180 menit.



Gambar 4. 7 Kurva Fotolisis Larutan BG

c. Uji Aktivitas Fotokatalis

Dalam pengujian fotokatalisis ini dilakukan tiga variasi yaitu sebagai berikut:

1) Variasi waktu kontak

Nilai persentase degradasi pada Gambar 4.8 menunjukkan bahwa tidak semua sistem lembar tipis mampu memberikan efisiensi penguraian zat warna yang optimal. Sampel PLA/MWCNT 1% menunjukkan nilai degradasi negative sebesar -4,59%, yang mengindikasikan tidak adanya proses degradasi, bahkan dimungkinkan terjadi desorpsi atau pelepasan kembali zat warna ke dalam larutan. Hal ini memperkuat bahwa

MWCNT tanpa tambahan semikonduktor fotokatalitik belum mampu berfungsi efektif dalam proses degradasi fotokatalitik. Meski memiliki luas permukaan besar, MWCNT lebih berperan sebagai adsorpsi pasif, dan tanpa eksitasi elektron dari semikonduktor, tidak terjadi pembentukan spesies aktif seperti $\bullet\text{OH}$ dan $\bullet\text{O}_2^-$ yang diperlukan untuk mendegradasi molekul pewarna (Malekkiani et al., 2022).

Sampel PLA/PEG memberikan nilai degradasi sebesar 13,65% yang dikaitkan dengan sifat hidrofilik PEG yang memfasilitasi adsorpsi fisik zat warna pada permukaan film. Karena tidak mengandung material fotokatalitik, tidak terjadi reaksi penguraian oleh cahaya, dan penurunan konsentrasi zat warna hanya berasal dari penyerapan ke dalam matriks polimer. PEG sebagai polimer yang bersifat hidrofilik dapat menarik molekul air dan zat warna melalui interaksi hidrogen. Namun, efisiensinya terbatas karena tidak ada pembentukan radikal aktif (Hasanuddin et al., 2022).

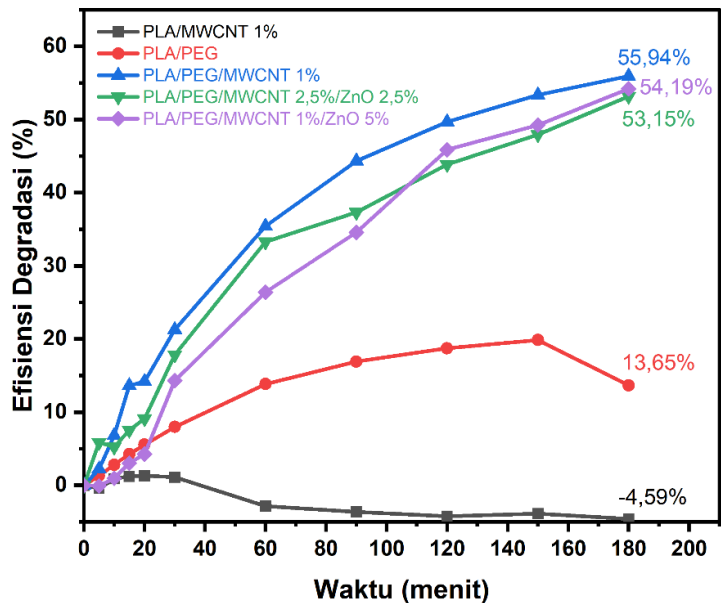
Sampel PLA/PEG/MWCNT 1% menghasilkan degradasi hingga 55,94%. Hal ini menunjukkan kontribusi sinergis antara adsorpsi oleh PEG dan aktivitas semu-fotokatalitik dari MWCNT. MWCNT yang telah mengalami fungsionalisasi dapat memperluas daerah aktif dan mempercepat interaksi antara molekul zat warna dan lembar tipis. Selain itu, eksitasi ringan pada MWCNT oleh cahaya UV dapat menyebabkan perpindahan muatan yang mendukung pembentukan spesies reaktif, meskipun terbatas (Jagadish Shetty et al., 2024). Peningkatan efisiensi ini menunjukkan bahwa MWCNT berperan dalam meningkatkan transport muatan dan mempercepat penguraian ikatan organik pada zat warna (Dinari et al., 2016).

Kombinasi antara ZnO dan MWCNT pada sampel PLA/PEG/MWCNT 2,5%/ZnO 2,5% menghasilkan nilai degradasi sebesar 53,15%. Meskipun mengandung fotokatalis ZnO, nilai ini tidak lebih tinggi dibandingkan sampel sebelumnya. Hal ini mungkin

disebabkan oleh agregasi ZnO dalam matriks, yang mengurangi luas permukaan aktif dan menghambat efisiensi penyerapan cahaya UV (Sarvalkar et al., 2024). ZnO berperan penting dalam menyerap cahaya dan menghasilkan radikal aktif namun distribusi yang tidak merata atau aglomerasi partikel dapat menurunkan efektivitasnya. MWCNT tetap membantu transfer muatan dan memperlambat rekombinasi elektron-lubang, tetapi sinergi optimal mungkin belum tercapai pada konsentrasi ini (Malekkiani et al., 2022).

Pada sampel dengan ZnO 5%, nilai degradasi mencapai 54,19% yang masih tidak jauh berbeda dengan ZnO 2,5%. Peningkatan konsentrasi ZnO tidak memberikan peningkatan signifikan, kemungkinan karena pada konsentrasi tinggi, ZnO mengalami aglomerasi yang lebih kuat, sehingga menurunkan luas permukaan aktif dan kemampuan penyinaran sinar UV (Azmina et al., 2017; Sasikala et al., 2019). Selain itu, partikel ZnO yang berlebihan dapat menutupi

permukaan MWCNT dan mengganggu jalur transfer muatan, sehingga justru menurunkan efisiensi degradasi. Walaupun demikian, hasil ini tetap menunjukkan bahwa mekanisme penguraian fotokimia berbasis cahaya tetap terjadi, namun tidak optimal (Dagar et al., 2025; Hosseini et al., 2018).

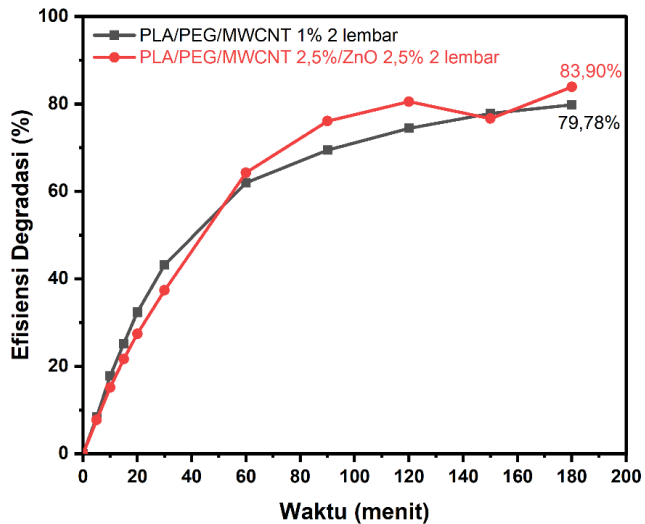


Gambar 4. 8 Persentase Efisiensi Degradasi MB Menggunakan Berbagai Variasi Lembar Tipis sebagai Fotokatalis

2) Variasi Jumlah Katalis

Gambar 4.9 menunjukkan perbandingan kemampuan dua jenis lembar

tipis dalam menguraikan zat warna BG saat menggunakan dua lembar katalis. Sampel PLA/PEG/MWCNT 2,5%/ZnO 2,5% memiliki tingkat degradasi sebesar 83,90%, sedikit lebih tinggi dari PLA/PEG/MWCNT 1% yang mencapai 79,78%. Peningkatan jumlah lembar katalis memperluas area kontak dengan larutan, sehingga proses penyerapan zat warna menjadi lebih efektif. Pada sampel PLA/PEG/MWCNT 1%, meskipun tidak mengandung bahan fotokatalis seperti ZnO, peningkatan degradasi yang terjadi bukan hanya karena penyerapan zat warna saja. Hal ini juga disebabkan oleh kemampuan MWCNT dalam menyerap Sebagian sinar UV dan membantu pergerakan muatan listrik di dalam material. Hal ini memungkinkan tetap terbentuknya zat-zat reaktif yang bisa membantu merusak struktur zat warna. Jadi, meskipun tanpa fotokatalis aktif, proses degradasi tetap terjadi karena gabungan antara penyerapan dan sedikit reaksi yang dipicu oleh cahaya.



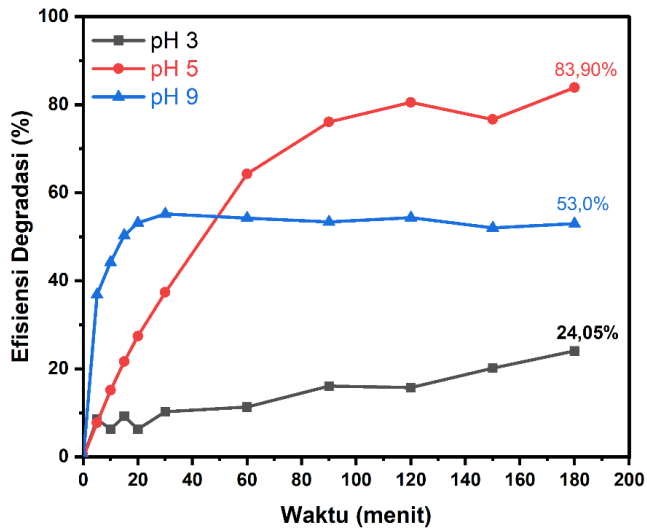
Gambar 4. 9 Persentase Efisiensi Degradasi BG menggunakan 2 Lembar Katalis

3) Variasi pH Larutan *brilliant green* (BG)

Pengujian fotokatalisis selanjutnya dilakukan pada variasi pH menggunakan dua lembar katalis PLA/PEG/MWCNT 2,5%/ZnO 2,5% berukuran 2×2 cm. pH yang digunakan meliputi asam (pH 3), netral (pH 5), dan basa (pH 9). Kondisi pH berpengaruh terhadap mekanisme degradasi dan pembentukan radikal hidroksil dalam proses fotokatalitik

Hasil variasi pH Gambar 4.10 menunjukkan bahwa degradasi tertinggi terjadi pada pH netral (83,90%), diikuti pH

basa (53,0%) dan pH asam (24,05%). Efektivitas ini dipengaruhi oleh perubahan muatan permukaan ZnO yang dilapisi PEG akibat variasi pH, yang memengaruhi kemampuan adsorpsi terhadap molekul pewarna (Sulania et al., 2024). Pada pH asam, permukaan katalis menjadi bermuatan positif akibat terprotonasi, sehingga meningkatkan adsorpsi molekul pewarna bermuatan negatif dengan lubang oksida (h^+) sebagai agen oksidatif utama. Sebaliknya, pada pH netral hingga basa, radikal hidroksil ($\bullet OH$) lebih dominan dan efektif dalam mendegradasi senyawa organik. Hasil ini sejalan dengan penelitian Isai & Shrivastava, (2019) dan Sheikhi et al, (2023), yang menyatakan bahwa jenis spesies oksidatif dalam sistem fotokatalitik bergantung pada pH larutan.



Gambar 4. 10 Persentase Efisiensi Degradasi BG pada variasi pH Larutan

Efektivitas fotokatalis pada lembar tipis PLA/PEG/MWCNT/ZnO merupakan hasil dari sinergi antara hasil XRD, FTIR, dan uji sudut kontak. Berdasarkan hasil XRD, penambahan ZnO meningkatkan derajat kristalinitas lembar tipis, sehingga sampel dengan derajat kristalinitas tertinggi menunjukkan efektivitas fotokatalisis paling baik (Bagheri et al., 2020). Sementara itu, keterkaitan dengan gugus fungsi ditunjukkan oleh spektrum FTIR pada masing-masing lembar tipis. Meskipun pita Zn-O dan gugus -

OH tidak teridentifikasi dengan jelas dalam spektrum yang diperoleh, keberhasilan pencampuran material tetap didukung oleh hasil karakterisasi lain. Oleh karena itu, efektivitas fotokatalisis dalam penelitian ini lebih dipengaruhi oleh keberadaan ZnO sebagai material aktif yang didukung oleh struktur kristalnya yang baik. Selain itu, uji sudut kontak menunjukkan bahwa variasi sifat hidrofilik dan hidrofobik turut memengaruhi luas permukaan efektif antara material dan larutan polutan. Sifat hidrofilik akibat penambahan PEG dan MWCNT memperbesar interaksi material dengan larutan, sementara sifat hidrofobik akibat penambahan ZnO tetap memberikan kontribusi terhadap efektivitas fotokatalisis melalui aktivitas kristalinnya yang tinggi (Fu et al., 2023).

d. Kinetika Reaksi

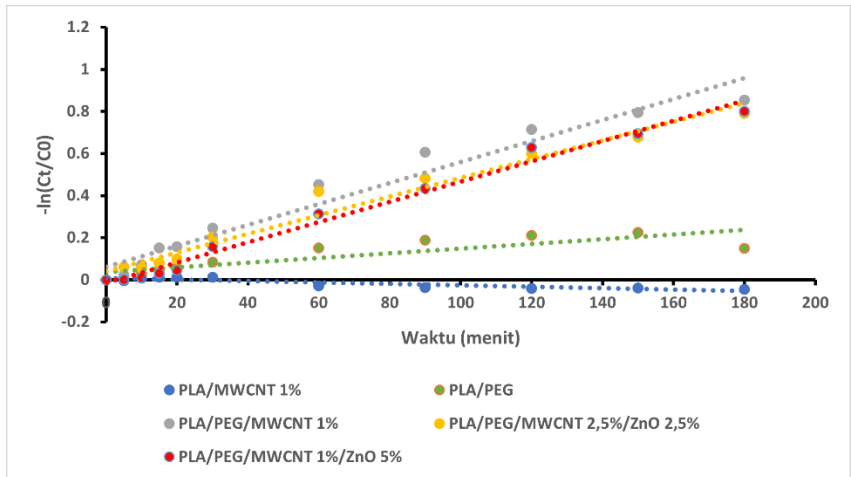
Perilaku kinetika dari masing-masing lembar tipis dalam proses fotokatalisis terhadap zat warna BG dapat dilihat pada Gambar 4.11. Grafik kinetika terdapat pada

Gambar 4.11 yang memperlihatkan bahwa laju degradasi meningkat seiring dengan penambahan ZnO pada komposit PLA/PEG/MWCNT. Peningkatan ini mengindikasikan bahwa keberadaan ZnO sebagai fotokatalis anorganik mampu mempercepat pemecahan molekul pewarna di bawah penyinaran sinar UV (Purushotham et al., 2025). ZnO diketahui memiliki celah pita yang sesuai, yang memungkinkannya menghasilkan pasangan elektron-lubang saat terpapar cahaya UV. Pasangan ini kemudian berperan aktif dalam pembentukan radikal hidroksil dan radikal superoksida yang sangat reaktif, dan berkontribusi pada degradasi senyawa organik (Mohamed et al., 2023). Nilai konstanta laju reaksi (k) dihitung berdasarkan model kinetika orde satu semu (pseudo-first-order kinetics), dan hasilnya menunjukkan bahwa sampel PLA/PEG/MWCNT 1%/ZnO 5% memiliki nilai konstanta laju tertinggi yaitu sebesar $k=0,00488$ menit⁻¹. Nilai ini lebih tinggi dibandingkan sampel lainnya, menandakan

bahwa penambahan ZnO sebesar 5% merupakan komposisi optimal dalam sistem ini untuk meningkatkan efisiensi fotokatalitik. Peningkatan nilai konstanta laju ini juga dapat dikaitkan dengan sinergi antara ZnO dan MWCNT. MWCNT tidak hanya berperan sebagai pendukung struktur, tetapi juga membantu dalam pemisahan muatan, sehingga menghambat rekombinasi cepat antara elektron dan lubang (Dagar et al., 2025). Di sisi lain, keberadaan PEG berkontribusi dalam dispersi yang lebih baik antar partikel dan meningkatkan transfer massa pewarna ke permukaan aktif fotokatalis (Hamdan et al., 2020).

Tabel 4. 3 Nilai Konstanta Laju Reaksi dan Nilai Regresi dari Masing-Masing Sampel

Sampel	k (menit ⁻¹)	R ²
PLA/MWCNT 1%	-3.40E-04	0.7971
PLA/PEG	0.001081	0.7423
PLA/PEG/MWCNT 1%	0.004679	0.9594
PLA/PEG/MWCNT 2,5%/ZnO 2,5%	0.004262	0.9717
PLA/PEG/MWCNT 1%/ZnO 5%	0.00488	0.987



Gambar 4. 11 Kurva Kinetika Reaksi Pseudo-Orde Pertama

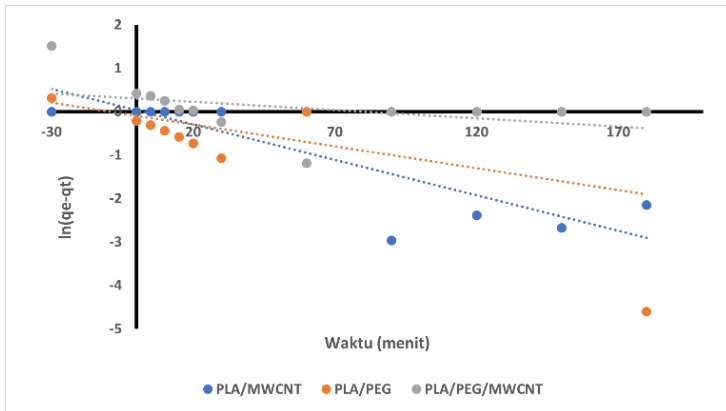
e. Kinetika Adsorpsi

1) Kinetika Pseudo-first order

Gambar 4.12 tersebut menunjukkan grafik hubungan antara $\ln(q_e - q_t)$ terhadap waktu (menit) untuk tiga jenis sampel, yaitu PLA/MWCNT, PLA/PEG, dan PLA/PEG/MWCNT, yang dianalisis menggunakan model kinetika pseudo orde pertama. Grafik ini digunakan untuk mengevaluasi apakah proses adsorpsi mengikuti mekanisme pseudo first-order, yang mengasumsikan bahwa laju adsorpsi bergantung pada

jumlah situs aktif yang belum terisi secara proporsional. Dari grafik terlihat bahwa dua sampel, yaitu PLA/MWCNT dan PLA/PEG, menunjukkan hubungan linier yang cukup baik dengan kemiringan negatif yang jelas, mengindikasikan bahwa mekanisme adsorpsi pada kedua sampel ini sesuai dengan model pseudo orde pertama. Sebaliknya, sampel PLA/PEG/MWCNT menunjukkan pola yang kurang linier dan cenderung mendatar, yang menunjukkan bahwa model pseudo first-order kurang tepat menggambarkan laju adsorpsi pada sistem tersebut. Hal ini dapat disebabkan oleh adanya interaksi kimia yang lebih kompleks akibat kombinasi PEG dan MWCNT dalam matriks PLA, yang kemungkinan lebih sesuai dijelaskan oleh model pseudo orde kedua (Hasanuddin et al., 2022). Oleh karena itu, grafik ini mengindikasikan bahwa hanya sebagian sampel yang mengikuti mekanisme kinetika pseudo orde pertama secara baik,

dan analisis lanjutan menggunakan model lain diperlukan untuk memahami keseluruhan perilaku adsorpsi secara menyeluruh. Tabel 4.4 menunjukkan nilai konstanta laju reaksi k dan R^2 dari model kinetika pseudo-orde pertama untuk tiga jenis sampel. Nilai R^2 tertinggi ditunjukkan oleh sampel PLA/MWCNT 1% (0,733), yang menunjukkan kesesuaian model yang lebih baik dibanding dua sampel lainnya. Sebaliknya, nilai R^2 pada PLA/PEG (0,2604) dan PLA/PEG/MWCNT 1% (0,1729) tergolong sangat rendah, menunjukkan bahwa model pseudo-orde pertama tidak menggambarkan mekanisme adsorpsi secara akurat pada kedua sistem tersebut.



Gambar 4. 12 Kurva Kinetika Adsorpsi Pseudo-Orde Pertama

Tabel 4. 4 Nilai Konstanta Laju Adsorpsi dan Nilai Regresi dari Masing-Masing Sampel

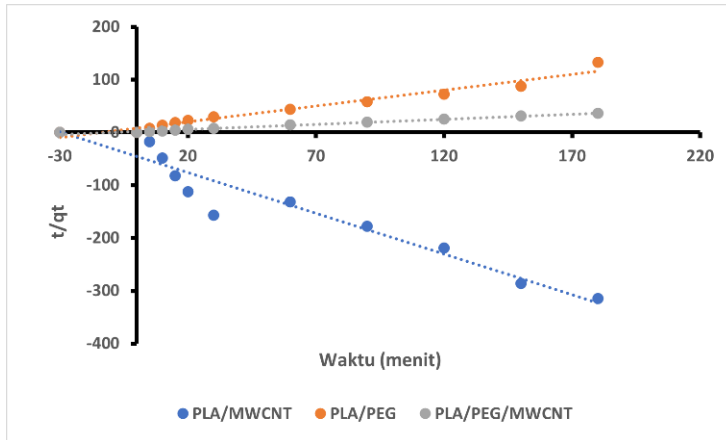
Sampel	k (menit ⁻¹)	R ²
PLA/MWCNT 1%	0.016	0.733
PLA/PEG	0.010	0.2604
PLA/PEG/MWCNT 1%	0.0038	0.1729

2) Kinetika Pseudo-second order

Gambar menunjukkan hubungan antara waktu dan rasio perubahan jumlah adsorbat terhadap waktu untuk tiga jenis sampel, yaitu PLA/MWCNT, PLA/PEG, dan PLA/PEG/MWCNT, berdasarkan model kinetika pseudo-orde kedua. Model ini menggambarkan proses adsorpsi yang

melibatkan ikatan kimia antara gugus aktif adsorben dan molekul adsorbat (chemisorption). Berdasarkan kurva, sampel PLA/PEG dan PLA/PEG/MWCNT menunjukkan pola linier yang baik dengan arah naik, menandakan kesesuaian tinggi terhadap model pseudo-orde kedua. Hal ini menunjukkan bahwa proses adsorpsi pada kedua sampel kemungkinan besar berlangsung melalui mekanisme interaksi kimia yang kuat (Hasanuddin et al., 2022). Sebaliknya, sampel PLA/MWCNT menunjukkan pola yang tidak logis dengan nilai rasio yang negatif, sehingga tidak sesuai dengan model ini. Ketidaksesuaian ini dapat disebabkan oleh kesalahan perhitungan data atau karena mekanisme adsorpsi pada sistem tersebut lebih tepat dijelaskan dengan model pseudo-orde pertama. Keberadaan PEG dalam sistem terbukti memperbaiki kesesuaian terhadap model kinetika pseudo-orde kedua, diduga karena

peningkatan interaksi antarmolekul (Mandal et al., 2019).



Gambar 4. 13 Kurva Kinetika Adsorpsi Pseudo-Orde Kedua

Tabel 4. 5 Nilai Konstanta Laju Adsorpsi dan Nilai Regresi dari Masing-Masing Sampel

Sampel	k (menit ⁻¹)	R ²
PLA/MWCNT 1%	0.053519	0.9101
PLA/PEG	0.065661	0.9669
PLA/PEG/MWCNT 1%	0.031651	0.9971

BAB V

PENUTUP

A. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai fabrikasi lembar tipis berbasis PLA/PEG/MWCNT/ZnO sebagai fotokatalis material untuk degradasi zat warna *brilliant green*, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Hasil karakterisasi XRD menunjukkan bahwa penambahan PEG dan MWCNT meningkatkan intensitas puncak difraksi PLA, yang menandakan peningkatan kristalinitas. Puncak MWCNT tampak samar, mengindikasikan struktur yang cenderung amorf. Penambahan ZnO menghasilkan puncak difraksi baru sesuai dengan struktur kristal heksagonal wurtzite, namun pada konsentrasi tinggi menurunkan kristalinitas PLA dan PEG akibat aglomerasi ZnO. Nilai jarak antar bidang (d) menurun seiring penambahan filler, mencerminkan struktur lebih rapat. Ukuran kristal (D) dan derajat kristalinitas (X_c) tertinggi terdapat pada sampel PLA/PEG/MWCNT 2,5%/ZnO 2,5% yaitu sebesar 20,8 nm dan 45,3% yang mendukung potensi fotokatalitik material.

2. Hasil karakterisasi FTIR menunjukkan adanya gugus-gugus fungsi khas dari masing-masing bahan penyusun, seperti gugus karbonil ($C=O$) dari PLA, ikatan C-H yang menunjukkan keberadaan PEG, serta gugus karbonil ($C=O$) dan gugus eter ($C-O$) dari MWCNT. Selain itu, terdapat indikasi adanya interaksi antar komponen yang mendukung terbentuknya struktur komposit.
3. Hasil pengukuran sudut kontak menunjukkan bahwa penambahan PEG dan MWCNT menurunkan sudut kontak, dengan nilai terendah $51,2^\circ$, pada sampel PLA/PEG/MWCNT 1%, menandakan sifat hidrofilik yang lebih tinggi. Sifat ini memperbesar luas permukaan kontak dengan larutan, sehingga mendukung efektivitas fotokatalisis. Sebaliknya, penambahan ZnO meningkatkan sudut kontak hingga $81,1^\circ$, menunjukkan sifat lebih hidrofobik. Meskipun demikian, ZnO tetap berperan aktif dalam menghasilkan radikal oksidatif, sehingga proses fotokatalisis tetap dapat berlangsung secara efektif.

4. Hasil uji fotokatalis menunjukkan bahwa lembar tipis berbasis PLA/PEG/MWCNT/ZnO memiliki efisiensi degradasi yang tinggi sebesar 54% terhadap zat warna *brilliant green*, sehingga berpotensi digunakan sebagai material fotokatalis dalam pengolahan limbah zat warna.

B. Saran

1. Optimasi komposisi MWCNT dan ZnO diperlukan untuk menyeimbangkan kristalinitas material dan aktivitas fotokatalitik guna meningkatkan performa fotokatalisis.
2. Pengujian lanjutan terhadap fotokatalis ini perlu dilakukan menggunakan berbagai jenis pewarna, serta diuji dalam kondisi air limbah nyata. Selain itu, perlu dilakukan evaluasi terhadap stabilitas fotokatalis setelah beberapa siklus degradasi guna mengetahui efektivitas, daya tahan, dan efisiensi penggunaan secara berulang dalam skala aplikasi yang lebih luas.
3. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan melakukan karakterisasi tambahan, seperti FESEM-EDX, TEM, dan pengujian nilai energi gap pada semua sampel, agar mendapatkan informasi lebih detail mengenai dispersi partikel ZnO dan

MWCNT dalam matriks polimer, serta untuk mengetahui mekanisme proses fotokatalisis secara lebih mendalam.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdulhadi, B. A., Kot, P., Hashim, K. S., Shaw, A., & Khaddar, R. Al. (2019). Influence of Current Density and Electrodes Spacing on Reactive Red 120 Dye Removal from Dyed Water Using Electrocoagulation/Electroflotation (EC/EF) Process. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 584(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/584/1/012035>
- Adam, F., Himawan, A., Aswad, M., Ilyas, S., Heryanto, Anugrah, M. A., & Tahir, D. (2021). Green Synthesis of Zinc Oxide Nanoparticles Using Moringa oleifera l. Water Extract and its Photocatalytic Evaluation. *Journal of Physics: Conference Series*, 1763(1), 012002. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1763/1/012002>
- Adekanmi, A. A., Adekanmi, S. A., & Adekanmi, O. shafiu. (2020). Studies on Qualitative and Quantitative Phytochemical Constituents of Moringa oleifera leaf Meal. *International Journal of CEngineering and Information Systems (IJEAIS)*, 4(5), 10–17.
- Ahmad, A. F., Aziz, S. A., Obaiys, S. J., Zaid, M. H. M., Matori, K. A., Samikannu, K., & Aliyu, U. S. as. (2020).

Biodegradable poly (lactic acid)/poly (ethylene glycol) reinforced multi-walled carbon nanotube nanocomposite fabrication, characterization, properties, and applications. *Polymers*, 12(2), 1–22. <https://doi.org/10.3390/polym12020427>

Ajmal, A., Majeed, I., Malik, R. N., Idriss, H., & Nadeem, M. A. (2014). Principles and Mechanisms of Photocatalytic Dye Degradation On TiO₂ Based Photocatalysts: A Comparative Overview. *RSC Advances*, 4(70), 37003–37026. <https://doi.org/10.1039/c4ra06658h>

Akbar, M. F., & Yusuf, M. Y. (2024). Interpretasi Tafsir Ekologi dan Hakikat Kepemimpinan: Telaah QS. Ar-Rum : 41 Menggunakan Teori Maqashidu Syari'ah. *Attractive : Innovative Education Journal*, 6(2), 155–165.

Alexa-Stratulat, S. M., Stoian, G., Ghemeș, I. A., Toma, A. M., Covatariu, D., & Toma, I. O. (2023). Effect of a New Multi-Walled CNT (MWCNT) Type on the Strength and Elastic Properties of Cement-Based Mortar. *Coatings*, 13(3). <https://doi.org/10.3390/coatings13030492>

Alkaim, A. F., Sadik, Z., Mahdi, D. K., Alshrefi, S. M., Al-Sammarraie, A. M., Alamgir, F. M., Singh, P. M., & Aljeboree, A. M. (2015). Preparation, Structure and

Adsorption Properties of Synthesized Multiwall Carbon Nanotubes for Highly Effective Removal of Maxilon Blue Dye. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 32(12), 2456–2462.
<https://doi.org/10.1007/s11814-015-0078-y>

Anaraki, N. A., Rad, L. R., Irani, M., & Haririan, I. (2015). Fabrication of PLA/PEG/MWCNT Electrospun Nanofibrous Scaffolds for Anticancer Drug Delivery. *Journal of Applied Polymer Science*, 132(3), 1–9.
<https://doi.org/10.1002/app.41286>

Andrade-Guel, M., Cabello-Alvarado, C. J., Cadenas-Pliego, G., & Ávila-Orta, C. A. (2022). PLA-ZnO/TiO₂ Nanocomposite Obtained by Ultrasound-Assisted Melt-Extrusion for Adsorption of Methylene Blue. *Nanomaterials*, 12(23).
<https://doi.org/10.3390/nano12234248>

Anggita, S. R., & Setiawan, H. (2021). *Fotokatalis ZnO:Ag dan Aplikasinya* (pertama). CV. Alinea Media Dipantara.

Anggita, S. R., & Susanto, H. (2016). Preparation and Microstructure of Ag Doped on ZnO. *Journal of Natural Sciences and Mathematics Research*, 2(2), 148–152.
<https://doi.org/10.21580/jnsmr.2016.1.2.1657>

Arat, A. B., & Akyildiz, H. I. (2024). A Mechanistic Approach to Determine the Relationship Between Film Structure, Electronic Properties, and Photocatalytic Activity of ALD ZnO Thin Films On Glass Fibers. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 35(16), 1–13. <https://doi.org/10.1007/s10854-024-12843-7>

Arun, V., Priyadharsan, A., Rahmayanti, Y. D., Afzal, M., Gnanasekaran, L., Permana, Y., Astuti, W. D., Da, O. W., Khoerunnisa, F., & Handayani, M. (2025). Synthesis and Photocatalytic Performance of ZnO/NiO-Decorated Reduced Graphene Oxide Nanohybrids for Methylene Blue Degradation. *Springer*.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11581-025-06220-5>

Arunkuma, T., Karthikeyan, R., Subramani, R. R., Viswanathan, K., & Anish, M. (2020). Synthesis and Characterisation of Multi-Walled Carbon Nanotubes (MWCNTs). *International Journal of Ambient Energy*, 41(4), 452–456.

Ashokkumar, M., Rajkumar, M., & Pugazhvadivu, K. S. (2023). Assessment of Properties, Photocatalytic Activity, Cytotoxicity, and Antibacterial Activity of (Cu,

Cr) Dual-Doped ZnO Nanoparticles. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 33(9), 2974–2983. <https://doi.org/10.1007/s10904-023-02730-9>

Ashrafi, S. D., Safari, G. H., Sharafi, K., Kamani, H., & Jaafari, J. (2021). Adsorption of 4-Nitrophenol on Calcium Alginate-Multiwall Carbon Nanotube Beads: Modeling, Kinetics, Equilibriums and Reusability Studies. *International Journal of Biological Macromolecules*, 185, 66–76. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.06.081>

Astuti. (2016). *BAB IV Karakterisasi Material*. July, 1–12. <https://doi.org/https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1589.6567>

Astuti, B., Sugianto, S., Maftuchah, I., Firmahaya, N. A., Marwoto, P., Nurhamid, N., Darsono, T., Aryanto, D., & Isnaeni, I. (2022). Efek Daya Plasma Terhadap Sifat Fotoluminesen Film Tipis ZnO Doping Al. *Inovasi Kimia*, 1, 160–196. <https://doi.org/10.15294/ik.v1i1.66>

Awadallah-F, A., & Al-Muhtaseb, S. (2020). Carbon Nanoparticles-Decorated Carbon Nanotubes. *Scientific Reports*, 10(1), 1–7. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61726-4>

- Ayuningtyas, E. (2020). Penurunan Kadar Warna dan Fenol Air Limbah Batik menggunakan Metode Advanced Oxidation Processes (AOPs) Berbasis Ozon-GAC. *Jurnal Rekayasa Lingkungan*, 20(2), 31–37. <http://journal.ity.ac.id/index.php/JRL/article/view/53%0Ahttp://journal.ity.ac.id/index.php/JRL/article/download/53/48>
- Azmina, M. S., Nor, R. M., Rafaie, H. A., Razak, N. S. A., Sani, S. F. A., & Osman, Z. (2017). Enhanced Photocatalytic Activity of ZnO Nanoparticles Grown On Porous Silica Microparticles. *Applied Nanoscience (Switzerland)*, 7(8), 885–892. <https://doi.org/10.1007/s13204-017-0626-3>
- Bagheri, M., Najafabadi, N. R., & Borna, E. (2020). Removal of Reactive Blue 203 Dye Photocatalytic Using ZnO Nanoparticles Stabilized On Functionalized MWCNTs. *Journal of King Saud University - Science*, 32(1), 799–804. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2019.02.012>
- Batakliiev, T., Petrova-Doycheva, I., Angelov, V., Georgiev, V., Ivanov, E., Kotsilkova, R., Casa, M., Cirillo, C., Adami, R., Sarno, M., & Ciambelli, P. (2019). Effects of graphene nanoplatelets and multiwall carbon nanotubes on the structure and mechanical properties of Poly(lactic

acid) composites: A comparative study. *Applied Sciences* (Switzerland), 9(3).

<https://doi.org/10.3390/app9030469>

Bawazeer, T. M., Alsoufi, M. S., Shkir, M., Al-Shehri, B. M., & Hamdy, M. S. (2021). Excellent Improvement in Photocatalytic Nature of ZnO Nanoparticles via Fe Doping Content. *Inorganic Chemistry Communications*, 130, 108668.
<https://doi.org/10.1016/j.inoche.2021.108668>

Beg, S., Rahman, M., Jain, A., Saini, S., Hasnain, M. S., Swain, S., Imam, S., A, I. K., & Sohail. (2018). Emergence In the Functionalized Carbon Nanotubes as Smart Nanocarriers for Drug Delivery Applications. *A Pharmaceutical Approach*, 106–126.
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-813691-1.00004-X>

Behravan, M., Hossein Panahi, A., Naghizadeh, A., Ziaee, M., Mahdavi, R., & Mirzapour, A. (2019). Facile Green Synthesis of Silver Nanoparticles Using *Berberis vulgaris* Leaf and Root Aqueous Extract and its Antibacterial Activity. *International Journal of Biological Macromolecules*, 124, 148–154.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.11.101>

Benkraled, L., Zennaki, A., Zair, L., Arabeche, K., Berrayah, A., Barrera, A., Boubberka, Z., & Maschke, U. (2024). Effect of Plasticization/Annealing on Thermal, Dynamic Mechanical, and Rheological Properties of Poly(Lactic Acid). *Polymers*, 16(7). <https://doi.org/10.3390/polym16070974>

Bento, C., Katz, M., Santos, M. M. M., & Afonso, C. A. M. (2024). Striving for Uniformity: A Review on Advances and Challenges To Achieve Uniform Polyethylene Glycol. *Organic Process Research and Development*, 28, 860–890. <https://doi.org/10.1021/acs.oprd.3c00428>

Bhalla, N., Ingle, N., Jayaprakash, A., Patel, H., Patri, S. V., & Haranath, D. (2023). Green Approach to Synthesize Nano Zinc Oxide via Moringa oleifera Leaves for Enhanced Anti-Oxidant, Anti-Acne and Anti-Bacterial Properties for Health & Wellness Applications. *Arabian Journal of Chemistry*, 16(3), 104506. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2022.104506>

Brogly, M., Bistac, S., & Bindel, D. (2024). Adsorption and Structuration of PEG Thin Films: Influence of the Substrate Chemistry. *Polymers*, 16(9), 1244. <https://doi.org/10.3390/polym16091244>

Chairul Iswan, Maryanti, B., & Arifin, K. (2018). Analisis

Perbandingan Kekuatan Variasi Fraksi Volume Komposit Serat Ijuk Terhadap Sifat Mekanis Komposit Dengan Matriks Resin Epoksi. *SNITT- Politeknik Negeri Balikpapan*, 3(1), 36–43.

Chong, W. J., Pejak Simunec, D., Trinch, A., Kyratzis, I., Li, Y., Wright, P., Shen, S., Sola, A., & Wen, C. (2024). Advancing the additive manufacturing of PLA-ZnO nanocomposites by fused filament fabrication. *Virtual and Physical Prototyping*, 19(1). <https://doi.org/10.1080/17452759.2023.2285418>

da Silva, F. U., Luna, C. B. B., da Silva, F. S., Barreto, J. V. M., Schmitz, D. P., Soares, B. G., Wellen, R. M. R., & Araújo, E. M. (2025). Exploring the Effect of Annealing on PLA/Carbon Nanotube Nanocomposites: In Search of Efficient PLA/MWCNT Nanocomposites for Electromagnetic Shielding. *Polymers*, 17(2). <https://doi.org/10.3390/polym17020246>

Dagar, M., Kumar, S., Jain, A., Vohra, A., Singh, M., Dalal, J., Kumar, S., & Kaushal, S. (2025). Synergistic Ce/Ag/N-doped ZnO-MWCNT Nanocomposites for Efficient Photocatalytic Wastewater Remediation with Visible Light. *Materials Advances*, 4522–4537. <https://doi.org/10.1039/d5ma00258c>

Damajanti, N., Ma'ruf, A., & Nugraha, H. K. (2021). Aplikasi Zeolit Alam Aktif Wonosari sebagai Adsorben Zat Warna Remazol Yellow Fg. *Proceedings Series on Physical & Formal Sciences*, 1, 80–87. <https://doi.org/10.30595/pspfs.v1i.138>

Delgado, R. (2022). Misuse of Beer-Lambert Law and other calibration curves. *Royal Society Open Science*, 9(2). <https://doi.org/10.1098/rsos.211103>

Dinari, M., Momeni, M. M., & Ahangarpour, M. (2016). Efficient degradation of methylene blue dye over tungsten trioxide/multi-walled carbon nanotube system as a novel photocatalyst. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 122(10). <https://doi.org/10.1007/s00339-016-0403-2>

Doumeng, M., Makhoulouf, L., Berthet, F., Marsan, O., Delbé, K., Denape, J., & Chabert, F. (2021). A Comparative Study of the Crystallinity of Polyetheretherketone by Using Density, DSC, XRD, and Raman Spectroscopy Techniques. *Polymer Testing*, 93(October 2020). <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106878>

Durmaz, B. U., & Aytac, A. (2021). Effects of Polyol-Based Plasticizer Types and Concentration on the Properties

of Polyvinyl Alcohol and Casein Blend Films. *Journal of Polymers and the Environment*, 29, 313–322.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10924-020-01881-x>

El Hajam, M., Kandri, N. I., Harrach, A., & Zerouale, A. (2019). Adsorptive Removal of Brilliant Green Dye from Aqueous Solutions Using Cedar and Mahogany Sawdusts. *Scientific Study and Research: Chemistry and Chemical Engineering, Biotechnology, Food Industry*, 20(3), 395–409.

El Messaoudi, N., Miyah, Y., Al Qadr Imad Wan-Mohtar, W. A., Hanafiah, Z. M., Ighalo, J. O., Emenike, E. C., Georgin, J., Laabd, M., Nouren, L., Kausar, A., & Graba, B. (2024). Advancements In Adsorption and Photocatalytic Degradation Technologies of Brilliant Green from Water: Current Status, Challenges, and Future Prospects. *Materials Today Chemistry*, 42, 102399.
<https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2024.102399>

Erdem, F., Kandemir, H., & Alp, F. B. (2025). Effect of Polycaprolactone, Zinc Oxide, and Poly(ethylene glycol) on the Properties of Polylactic Acid Composite Fibers Obtained by Melt Electrospinning. *ACS Omega*, 10(1), 1457–1469.

<https://doi.org/10.1021/acsomega.4c09181>

Fadlelmoula, A., Pinho, D., Carvalho, V. H., Catarino, S. O., & Minas, G. (2022). Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy to Analyse Human Blood over the Last 20 Years: A Review towards Lab-on-a-Chip Devices. *Micromachines*, 13(2).
<https://doi.org/10.3390/mi13020187>

Farag, O. F., & Abdel-Fattah, E. (2023). Synthesis and characterization PVA/plasma-functionalized MWCNTs nanocomposites films. *Journal of Polymer Research*, 30(5), 1–13.
<https://doi.org/10.1007/s10965-023-03550-8>

Fathanah, U., Lubis, M. R., Mahyuddin, Z., Muchtar, S., Yusuf, M., Rosnelly, C. M., Mulyati, S., Hazliani, R., Rahmanda, D., Kamaruzzaman, S., & Busthan, M. (2021). Sintesis, Karakterisasi dan Kinerja Membran Hidrofobik Menggunakan Polyvinyl Pyrrolidone (PVP) sebagai Aditif. *ALCHEMY Jurnal Penelitian Kimia*, 17(2), 140.
<https://doi.org/10.20961/alchemy.17.2.48435.140-150>

Fatimah, S., Ragadhita, R., Al Husaeni, D. F., & Nandiyanto, A. B. D. (2022). How to Calculate Crystallite Size from X-Ray Diffraction (XRD) using Scherrer Method. *ASEAN*

Journal of Science and Engineering, 2(1), 65–76.
<https://doi.org/10.17509/ajse.v2i1.37647>

Feijoo, I., Pena, G., Cabeza, M., Cristóbal, M. J., & Rey, P. (2021). MWCNT-Reinforced AA7075 Composites: Effect of Reinforcement Percentage on Mechanical Properties. *Metals*, 11, 969.
<https://doi.org/https://doi.org/10.3390/met11060969>

Fitroh, A., Kaavessina, M., & Distantina, S. (2024). *Evaluation of the Chemical Structure and Thermal Properties of Polyethylene Glycol Polylactic Acid (PLA)/ Multiwalled Carbon Nanotube (MWCNT) Composites*. 07(02), 161–171. <https://doi.org/10.20885/ijca.vol7.iss2.art5>

Fu, N., Chen, H., Chen, R., Ding, S., & Ren, X. (2023). Effect of Calcination Temperature on the Structure, Crystallinity, and Photocatalytic Activity of Core-Shell SiO₂@TiO₂ and Mesoporous Hollow TiO₂ Composites. *Coatings*, 13(5).
<https://doi.org/10.3390/coatings13050852>

Gan, L., Geng, A., Wu, Y., Wang, L., Fang, X., Xu, L., & Mei, C. (2020). Antibacterial, Flexible, and Conductive Membrane Based on MWCNTs/Ag Coated Electrospun PLA Nanofibrous Scaffolds as Wearable Fabric

for Body Motion Sensing. *Polymers*, 12(1).
<https://doi.org/10.3390/polym12010120>

Gintu, A. R., & Puspita, D. (2020). Sintesis dan Karakterisasi Carbon Nanotube (CNT) dari Arang Kayu Jati serta Pemanfaatannya Sebagai Bahan Aktif Antibakteri. *Jurnal Kimia Riset*, 5(2), 127.
<https://doi.org/10.20473/jkr.v5i2.22505>

Goncharova, D. A., Bolbasov, E. N., Nemoykina, A. L., Aljulaih, A. A., Tverdokhlebova, T. S., Kulinich, S. A., & Svetlichnyi, V. A. (2021). Structure and properties of biodegradable PLLA/ZnO composite membrane produced via electrospinning. *Materials*, 14(1), 1–13.
<https://doi.org/10.3390/ma14010002>

Greco, A., Ferrari, F., & Maffezzoli, A. (2019). Processing of super tough plasticized pla by rotational molding. *Advances in Polymer Technology*, 2019.
<https://doi.org/10.1155/2019/3835829>

GungorErtugral, T., Coşkun, Y., Oral, A., & Ulusoy, S. (2024). Preparation and Characterization of Poly(lactic acid)-Based Poly(ethylene glycol) and Daphne Essential Oil-Loaded Smart Nanofibers for Thermal Protection. *ACS Omega*, 9(42), 42679–42686.
<https://doi.org/10.1021/acsomega.3c07720>

Guo, W., Wang, E., Mao, Y., Peng, Z., Li, P., Li, B., Huang, Y., Wang, S., Liu, B., You, H., & Long, Y. (2025). 3D-Printed PLA/PEG Bone Scaffold: Body-Adaptive Thermally Responsive Shape Memory and Enhanced Biological Performance. *Surfaces and Interfaces*, 56(December 2024), 105712. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2024.105712>

Guo, X., & Wang, J. (2019). A general kinetic model for adsorption: Theoretical analysis and modeling. *Journal of Molecular Liquids*, 288, 111100. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.111100>

Hakim, L., Dirgantara, M., & Nawir, M. (2019). Karakterisasi Struktur Material Pasir Bongkahan Galian Golongan C Dengan Menggunakan X-Ray Difrraction (X-RD) Di Kota Palangkaraya. *Jurnal Jejaring Matematika Dan Sains*, 1(1), 44–51. <https://doi.org/10.36873/jjms.v1i1.136>

Halida Ramadanti, A., & Kartika Maharani, D. (2022). Green Synthesis of ZnO Nanoparticles with Papaya Leaf Extract (*Carica papaya* L.) as a Reductor and its Application on Cotton Fabrics. *Indonesian Journal of Chemical Science*, 11(3), 198–206. <http://journal.unnes.ac.id/sju/index.php/ijcs>

Hamdan, M. A. H., Hairom, N. H. H., Ahmad, M. K., Madon, R.

H., Dzinun, H., & Bakar, D. A. (2020). *Photocatalytic Degradation of Industrial Dye Wastewater in Presence of ZnO-PEG Nanoparticles*. 4, 7–12.

Hammani, S., Daikhi, S., Bechelany, M., & Barhoum, A. (2022). Role of ZnO Nanoparticles Loading in Modifying the Morphological, Optical, and Thermal Properties of Immiscible Polymer (PMMA/PEG) Blends. *Materials*, 15(23).
<https://doi.org/10.3390/ma15238453>

Handayani, M., Asih, G. I. N., Kusumaningsih, T., Kusumastuti, Y., & Rochmadi. (2022). Functionalization of Multi-walled Carbon Nanotubes–Silver Nanoparticle (MWCNTs-AgNPs) as a Drug Delivery System for Ibuprofen. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 12(2), 795–801.
<https://doi.org/10.18517/ijaseit.12.2.14773>

Hasan, M., Liu, Q., Kanwal, A., Tariq, T., Mustafa, G., Batool, S., & Ghorbanpour, M. (2024). A Comparative Study On Green Synthesis and Characterization of Mn Doped ZnO Nanocomposite for Antibacterial and Photocatalytic Applications. *Scientific Reports*, 14, 7528. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-58393-0>

- Hasanuddin, N. I., Mokhtar, W. N. A. W., Othaman, R., & Anuar, F. H. (2022). Poly(lactic acid)-poly(ethylene glycol)/Magnesium Silicate Membrane for Methylene Blue Removal: Adsorption Behavior, Mechanism, Ionic Strength and Reusability Studies. *Membranes*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/membranes12020198>
- Hashim, K. S., Al-Saati, N. H., Alquzweeni, S. S., Zubaidi, S. L., Kot, P., Kraidi, L., Hussein, A. H., Alkhaddar, R., Shaw, A., & Alwash, R. (2019). Decolourization of Dye Solutions by Electrocoagulation: An Investigation of the Effect of Operational Parameters. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 584(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/584/1/012024>
- Hazhari, F., Sehono, & Setiawan, F. (2022). Pengaruh Kekuatan Tarik Dan Kekuatan Bending Komposit Hybrid Dan Non-Hybrid Menggunakan Metode Vacuum Bagging. *Injection: Indonesian Journal of Vocational Mechanical Engineering*, 2(2), 53–58. <https://doi.org/10.58466/injection.v2i2.531>
- Hidayat, S. (2020). Aplikasi Perangkat Vacuum Infusion Untuk Pembuatan Komponen Berbahan Komposit. *Institut Teknologi Nasional - Bandung*, 12–20. <http://eprints.itenas.ac.id/id/eprint/838>

- Hosseini, F., Kasaeian, A., Pourfayaz, F., Sheikhpour, M., & Wen, D. (2018). Novel ZnO-Ag/MWCNT Nanocomposite for the Photocatalytic Degradation of Phenol. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 83, 175–185.
<https://doi.org/10.1016/j.mssp.2018.04.042>
- Huhtamäki, T., Tian, X., Korhonen, J. T., & Ras, R. H. A. (2018). Surface-Wetting Characterization Using Contact-Angle Measurements. *Nature Protocols*, 13(7), 1521–1538.
<https://doi.org/10.1038/s41596-018-0003-z>
- Irani, E., & Amoli-Diva, M. (2020). Hybrid Adsorption–Photocatalysis Properties of Quaternary Magneto-Plasmonic ZnO/MWCNTs Nanocomposite for Applying Synergistic Photocatalytic Removal and Membrane Filtration in Industrial Wastewater Treatment. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 391(November 2019), 112359.
<https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2020.112359>
- Irfan, F., Tanveer, M. U., Moiz, M. A., Husain, S. W., & Ramzan, M. (2022). TiO₂ as an Effective Photocatalyst Mechanisms, Applications, and Dopants: A Review. *European Physical Journal B*, 95(11), 1–13.
<https://doi.org/10.1140/epjb/s10051-022-00440-8>

Isai, K. A., & Shrivastava, V. S. (2019). Photocatalytic Degradation of Methylene Blue Using ZnO and 2%Fe-ZnO Semiconductor Nanomaterials Synthesized by Sol-Gel Method: A Comparative Study. *SN Applied Sciences*, 1(10), 1–11. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1279-5>

Jagadish Shetty, S., Shilpa, M. P., Shirish Bhat, S., Pavithra, K. S., Moorkoth, S., Gupta, A., Surabhi, S., Shivamurthy, R. C., & Gurumurthy, S. C. (2024). Surface Functionalized Multi-wall Carbon Nanotubes for Degradation of Organic Dyes. *Materials Chemistry and Physics*, 311(May 2023), 128566. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.128566>

Jayasekara, T., Surendra, Y. W., & Rathnayake, M. (2022). Polylactic Acid Pellets Production from Corn and Sugarcane Molasses: Process Simulation for Scaled-Up Processing and Comparative Life Cycle Analysis. *Journal of Polymers and the Environment*, 30(1), 4590–4604. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1007/s10924-022-02535-w>

Jeevarathinam, M., & Asharani, I. V. (2024). Synthesis of

CuO, ZnO nanoparticles, and CuO-ZnO nanocomposite for enhanced photocatalytic degradation of Rhodamine B: a comparative study. *Scientific Reports*, 14(1), 1–17. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-60008-7>

Jelani, A. R., & Sanjaya, H. (2022). Degradasi Zat Warna Metil Violet Menggunakan Metode Sonolisis Dengan Katalis ZnO-Ag. *Jurnal Periodic Jurusan Kimia UNP*, 11(3), 75. <https://doi.org/10.24036/p.v11i3.116210>

Jiang, Y., Yan, C., Shi, D., Liu, Z., & Yang, M. (2019). Enhanced Rheological Properties of PLLA with a Purpose-Designed PDLA - b - PEG - b - PDLA Triblock Copolymer and the Application in the Film Blowing Process to Acquire Biodegradable PLLA Films. *ACS Publication*, 14. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b01470>

Karimi, S., Ghasemi, I., Abbassi-Sourki, F., Samara, M., & Demarquette, N. R. (2022). PEG-Grafted Graphene/PLLA Nanocomposites: Effect of PEG Chain Length on Crystallization Kinetics of PLLA. *ACS Omega*. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c03397>

Khan, M., Ahmad, B., Hayat, K., Ullah, F., Sfina, N., Elhadi, M., Khan, A. A., Husain, M., & Rahman, N. (2024). Synthesis of ZnO and PEG-ZnO Nanoparticles (NPs) with

Controlled Size for Biological Evaluation. *RSC Advances*, 14(4), 2402–2409.
<https://doi.org/10.1039/d3ra07441b>

Khan, M. M., Adil, S. F., & Al-Mayouf, A. (2015). Metal oxides as photocatalysts. *Journal of Saudi Chemical Society*, 19(5), 462–464.
<https://doi.org/10.1016/j.jscs.2015.04.003>

Khan, S. A., Rahman, A., & Ibrahim, F. B. D. A. (2021). The impact of film thickness on the properties of ZnO/PVA nanocomposite film. *Materials Research Express*, 8(7).
<https://doi.org/10.1088/2053-1591/abf081>

Kim, I., Viswanathan, K., Kasi, G., Sadeghi, K., Thanakkasarane, S., & Seo, J. (2019). Poly (Lactic Acid) / ZnO Bionanocomposite Films with Positively Charged ZnO as Potential Antimicrobial Food Packaging Materials. *Polymers*, 11(9), 1427.
<https://doi.org/https://doi.org/10.3390/polym11091427>

Kotsilkova, R., Ivanov, E., Georgiev, V., Ivanova, R., Menseidov, D., Batakliiev, T., Angelov, V., Xia, H., Chen, Y., Bychanok, D., Kuzhir, P., Di Maio, R., Silvestre, C., & Cimmino, S. (2020). Essential nanostructure parameters to govern reinforcement and functionality

of poly(lactic) acid nanocomposites with graphene and carbon nanotubes for 3d printing application. *Polymers*, 12(6).
<https://doi.org/10.3390/POLYM12061208>

Kristianingrum, S. (2016). Handout Spektroskopi Inframerah. *Handout Spektroskopi Infra Merah*, 1(1), 1–15.

Kumar N.b., R., Crasta, V., Praveen, B. M., & Kumar, M. (2015). Studies On Structural, Optical and Mechanical Properties of MWCNTs and ZnO Nanoparticles Doped PVA Nanocomposites. *Nanotechnology Reviews*, 4(5), 457–467. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2015-0020>

Kumar, R., Alex, Y., Nayak, B., & Mohanty, S. (2023). Effect of Poly (Ethylene Glycol) On 3D Printed PLA/PEG Blend: A Study of Physical, Mechanical Characterization and Printability Assessment. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 141(February), 105813.
<https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2023.105813>

Laskar, N., & Kumar, U. (2019). Removal of Brilliant Green Dye from Water by Modified Bambusa Tulda: Adsorption Isotherm, Kinetics and Thermodynamics Study. *International Journal of Environmental Science*

and *Technology*, 16(3), 1649–1662.
<https://doi.org/10.1007/s13762-018-1760-5>

Law, K. Y. (2015). Water-Surface Interactions and Definitions for Hydrophilicity, Hydrophobicity and Superhydrophobicity. *Pure and Applied Chemistry*, 87(8), 759–765. <https://doi.org/10.1515/pac-2014-1206>

Li, F. J., Zhang, S. D., Liang, J. Z., & Wang, J. Z. (2015). Effect of Polyethylene Glycol On the Crystallization and Impact Properties of Polylactide-Based Blends. *Polymers for Advanced Technologies*, 26(5), 465–475. <https://doi.org/10.1002/pat.3475>

Li, G., Zhao, M., Xu, F., Yang, B., Li, X., Meng, X., & Teng, L. (2020). Synthesis and Biological Application of Polylactic Acid. *Molecules*, 25(21), 5023. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/molecules25215023>

Li, R., Wu, Y., Bai, Z., Guo, J., & Chen, X. (2020). Effect of molecular weight of polyethylene glycol on crystallization behaviors, thermal properties and tensile performance of polylactic acid stereocomplexes. *RSC Advances*, 10(69), 42120–42127. <https://doi.org/10.1039/d0ra08699a>

- Lin, Y., Hong, R., Chen, H., Zhang, D., & Xu, J. (2020). Green Synthesis of ZnO-GO Composites for the Photocatalytic Degradation of Methylene Blue. *Journal of Nanomaterials*, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/4147357>
- Luo, Y., Cao, Y., & Guo, G. (2018). Effects of TiO₂ Nanoparticles On the Photodegradation of Poly(lactic acid). *Journal of Applied Polymer Science*, 135(30), 1–8. <https://doi.org/10.1002/app.46509>
- Mahajan, M., Kaur, R., Gaur, J., Kumar, S., Kaushal, S., Kaur, H., Bajwa, A., Nainawat, A. K., & Singh, G. (2025). Surface-Modified ZnO Nanoparticles for Enhanced Environmental and Biomedical Performance. *Hybrid Advances*, 8(November 2024), 100342. <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2024.100342>
- Malekkiani, M., Heshmati Jannat Magham, A., Ravari, F., & Dadmehr, M. (2022). Facile Fabrication of Ternary MWCNTs/ZnO/Chitosan Nanocomposite for Enhanced Photocatalytic Degradation of Methylene Blue and Antibacterial Activity. *Scientific Reports*, 12(1), 5927. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-09571-5>
- Mallakpour, S., & Behranvand, V. (2017). Recycled

PET/MWCNT-ZnO Quantum Dot Nanocomposites: Adsorption of Cd(II) ion, Morphology, Thermal and Electrical Conductivity Properties. *Chemical Engineering Journal*, 313(Ii), 873–881. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.10.129>

Mandal, S., Kalaivanan, S., & Mandal, A. B. (2019). Polyethylene glycol-modified layered double hydroxides: Synthesis, characterization, and study on adsorption characteristics for removal of acid orange II from aqueous solution. *ACS Omega*, 4(2), 3745–3754. <https://doi.org/10.1021/acsomega.8b02743>

Marcus, R. N., Joseph, C. G., Taufiq-Yap, Y. H., Soloi, S., Majid, M. H. A., Jamain, Z., Ali, S. A. M., Vijayan, V., & Pang, C. K. (2022). Current Trends on the Utilization of Ozonation Treatment Process for the Remediation of Dye Wastewater: A Short Review. *Malaysian Journal of Chemistry*, 24(3), 113–124. <https://doi.org/10.55373/mjchem.v24i3.113>

Matussin, S. N., Khan, F., Harunsani, M. H., Kim, Y. M., & Khan, M. M. (2024). Photocatalytic degradation of brilliant green and 4-nitrophenol using Ni-doped Gd(OH)₃ nanorods. *Scientific Reports*, 14(1), 4–14. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-58688-2>

- Minhas, L. A., Mumtaz, A. S., Kaleem, M., Farraj, D. Al, Kamal, K., Minhas, M. A. H., Waqar, R., & Mahmoud, R. M. (2023). Green Synthesis of Zinc Oxide Nanoparticles Using *Nostoc* sp. and Their Multiple Biomedical Properties. *Catalysts*, 13(3). <https://doi.org/10.3390/catal13030549>
- Moezzi, M., Bakhtari, K., Ranjbar-Mohammadi, M., Kamali Moghaddam, M., & Barez, F. (2025). Fabrication and Characterization of Piezoelectric Poly (lactic acid)/ZnO Bionanocomposite Films. *Polymer Bulletin*, 4423–4442. <https://doi.org/10.1007/s00289-025-05706-6>
- Mohamed, K. M., Benitto, J. J., Vijaya, J. J., & Bououdina, M. (2023). Recent Advances in ZnO-Based Nanostructures for the Photocatalytic Degradation of Hazardous, Non-Biodegradable Medicines. *Crystals*, 13(2). <https://doi.org/10.3390/cryst13020329>
- Mojiri, A., Zhou, J. L., KarimiDermani, B., Razmi, E., & Kasmuri, N. (2023). Anaerobic Membrane Bioreactor (AnMBR) for the Removal of Dyes from Water and Wastewater: Progress, Challenges, and Future Perspectives. *Processes*, 11(855). <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/pr1103085>

Moldovan, A., Sarosi, I., Cuc, S., Prodan, D., Taut, A. C., Petean, I., Bombos, D., Doukeh, R., Nemes, O., & Man, S. C. (2025). Development and Characterization of PLA Food Packaging Composite. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 150(4), 2469–2481. <https://doi.org/10.1007/s10973-024-13841-x>

Muhaimin, M., Chaerunisaa, A. Y., Rostinawati, T., Amalia, E., Hazrina, A., & Nurhasanah, S. (2023). A Review On Nanoparticles of Moringa Oleifera Extract: Preparation, Characterization, and Activity. *International Journal of Applied Pharmaceutics*, 15(4), 43–51. <https://doi.org/10.22159/ijap.2023v15i4.47709>

Muraro, P. C. L., Mortari, S. R., Vizzotto, B. S., Chuy, G., dos Santos, C., Brum, L. F. W., & da Silva, W. L. (2020). Iron Oxide Nanocatalyst with Titanium and Silver Nanoparticles: Synthesis, Characterization and Photocatalytic Activity On the Degradation of Rhodamine B Dye. *Scientific Reports*, 10(1), 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59987-0>

Nandi, B. K., & Patel, S. (2017). Effects of Operational Parameters On the Removal of Brilliant Green Dye

from Aqueous Solutions by Electrocoagulation. *Arabian Journal of Chemistry*, 10, S2961–S2968. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.11.032>

Nikam, S., Suryawanshi, K., Shinde, N., Suryawanshi, V., & Professor, A. (2022). A Brief Review on Principle, Instrumentation and Analytical Parameter of Uv Spectroscopy. *International Journal on Novel Research and Development*, 7(11), 106–115. www.ijnrd.org

Nurmanjaya, A., Putra, S., & Megasari, K. (2018). Degradasi Zat Warna Lithol Dalam Medium Air dengan Radiasi Gamma. *Jurnal Inovasi Teknik Kimia*, 3(1). <https://doi.org/10.31942/inteka.v3i1.2121>

Oliveira, A. D. de, & Beatrice, C. A. G. (2019). Polymer Nanocomposites with Different Types of Nanofiller. *Nanocomposites - Recent Evolutions*, January. <https://doi.org/10.5772/intechopen.81329>

Paraschiv, D., Tudor, C., & Petrariu, R. (2015). The Textile Industry and Sustainable Development: A Holt-Winters Forecasting Investigation for the Eastern European Area. *Sustainability (Switzerland)*, 7(2), 1280–1291. <https://doi.org/10.3390/su7021280>

Peponi, L., Lieblich, M., & Benavente, R. (2020). In Vitro

Degradation of Plasticized PLA Electrospun Fiber Mats: Morphological , Thermal and. *Polymers*, 12, 2975. <https://doi.org/10.3390/polym12122975>

Peter, C. N., Anku, W. W., Sharma, R., Joshi, G. M., Shukla, S. K., & Govender, P. P. (2019). N-doped ZnO/graphene oxide: a photostable photocatalyst for improved mineralization and photodegradation of organic dye under visible light. *Ionics*, 25(1), 327–339. <https://doi.org/10.1007/s11581-018-2571-x>

Phuangthong, P., Li, W., Shen, J., Nofar, M., Worajittiphon, P., & Srithep, Y. (2024). The Effect of Polyethylene Glycol on the Non-Isothermal Crystallization of Poly(L-lactide) and Poly(D-lactide) Blends. *Polymers*, 16(15). <https://doi.org/10.3390/polym16152129>

Pinzari, F. (2024). Synthesis, Photocatalytic and Bio Activity of ZnO-TiO₂ Nanocomposites: A Review Study. *Reactions*, 5(4), 680–739. <https://doi.org/10.3390/reactions5040035>

Purushotham, D., Mavinakere Ramesh, A., Shetty Thimmappa, D., Kalegowda, N., Hittanahallikoppal Gajendramurthy, G., Kollur, S. P., & Mahadevamurthy, M. (2025). Green Synthesis of Zinc Oxide Nanoparticles Using Aqueous Extract of Pavonia zeylanica to Mediate

Photocatalytic Degradation of Methylene Blue: Studies on Reaction Kinetics, Reusability and Mineralization. *International Journal of Molecular Sciences*, 26(10), 1–15. <https://doi.org/10.3390/ijms26104739>

R, R., Philip, E., Madhavan, A., Sindhu, R., Pugazhendhi, A., Binod, P., Sirohi, R., Awasthi, M. K., Tarafdar, A., & Pandey, A. (2021). Advanced Biomaterials for Sustainable Applications in the Food Industry: Updates and Challenges. *Environmental Pollution*, 283, 117071. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117071>

Radwan-Pragłowska, J., Janus, Ł., Piatkowski, M., Bogdał, D., & Matysek, D. (2020). 3D Hierarchical, Nanostructured Chitosan/PLA/HA Scaffolds Doped with TiO₂/Au/Pt NPs with Tunable Properties for Guided Bone Tissue Engineering. *Polymers*, 12(4). <https://doi.org/10.3390/POLYM12040792>

Ragab, A., Ahmed, I., & Bader, D. (2019). The Removal of Brilliant Green Dye from Aqueous Solution Using Nano Hydroxyapatite/Chitosan Composite as a Sorbent. *Molecules*, 24(5). <https://doi.org/10.3390/molecules24050847>

Raganata, T. C., Aritonang, H., & Suryanto, E. (2020). Sintesis
135

Fotokatalis Nanopartikel ZnO untuk Mendegradasi Zat Warna Methylene Blue. *Chemistry Progress*, 12(2), 54–58. <https://doi.org/10.35799/cp.12.2.2019.27923>

Ramadhani, E. D., Audri, F. A., Sumada, K., Billah, M., & Suprihatin. (2024). Pengolahan Limbah Cair Industri Menggunakan Metode Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR) Bermedia Kaldness Dalam Menurunkan COD dan BOD. *Jurnal Kreativitas Teknologi Dan Komputer*, 15(6), 43–49.

Ramanathan, G., & Murali, K. R. (2022). Photocatalytic Activity of SnO₂ Nanoparticles. *Journal of Applied Electrochemistry*, 52(5), 849–859. <https://doi.org/10.1007/s10800-022-01676-z>

Ranakoti, L., Gangil, B., Mishra, S. K., Singh, T., Sharma, S., Ilyas, R. A., & El-Khatib, S. (2022). Critical Review on Polylactic Acid: Properties, Structure, Processing, Biocomposites, and Nanocomposites. *Materials*, 15(12). <https://doi.org/10.3390/ma15124312>

Rehman, R., Muhammad, S. J., & Arshad, M. (2019). Brilliant Green and Acid Orange 74 Dyes Removal from Water by *Pinus roxburghii* Leaves in Naturally Benign Way: An Application of Green Chemistry. *Journal of Chemistry*, 2019.

<https://doi.org/10.1155/2019/3573704>

Rihayat, T., Suryani, Fitriyani, C. N., Nurhanifa, Siregar, J. P., Jaafar, J., Cionita, T., & Fitria. (2020). Synthesis and Characterization of PLA-Chitosan-ZnO Composite for Packaging Biofilms. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 788(1).
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/788/1/012045>

Sabet, M. (2024). Multi-Walled Carbon Nanotube Reinforcement in Polypropylene Nanocomposites: Comprehensive Analysis of Thermal Behavior, Mechanical Properties, and Dispersion Characteristics. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 149(8), 3165–3179. <https://doi.org/10.1007/s10973-024-12893-3>

Sadegh, H., Shahryari-ghoshekandi, R., & Kazemi, M. (2014). Study In Synthesis and Characterization of Carbon Nanotubes Decorated by Magnetic Iron Oxide Nanoparticles. *International Nano Letters*, 4(4), 129–135. <https://doi.org/10.1007/s40089-014-0128-1>

Samlawi, A. K., Firmana Arifin, Y., & Permana, P. Y. (2018). Pembuatan dan Karakterisasi Material Komposit Serat Ijuk (*Arenga pinnata*) Sebagai Bahan Baku Cover Body Sepeda Motor. *Prosiding Seminar Nasional Lingkungan*

Lahan Basah, 3(2), 380–383.

Santoro, M., Shah, S. R., Walker, J. L., & Mikos, A. G. (2016). Poly(lactic acid) Nanofibrous Scaffolds for Tissue Engineering. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 107, 206–212.

<https://doi.org/10.1016/j.addr.2016.04.019>

Saputra, I. S., Suhartati, S., Yulizar, Y., & Sudirman, S. (2020). Green Synthesis Nanoparticle ZnO Menggunakan Media Ekstrak Daun Tin (*Ficus carica* Linn). *Jurnal Kimia Dan Kemasan*, 42(1), 1. <https://doi.org/10.24817/jkk.v42i1.5501>

Sarvalkar, P. D., Kamble, S. S., Powar, P. S., Kakade, S. S., Jamadar, A. S., Thounaojam, P., Patil, M. S., Kalake, S. V., Nimbalkar, M. S., & Sharma, K. K. K. (2024a). Synthesized rGO/f-MWCNT-Architected 1-D ZnO Nanocomposites for Azo Dyes Adsorption, Photocatalytic Degradation, and Biological Applications. *Catalysis Communications*, 187(November 2023), 106846. <https://doi.org/10.1016/j.catcom.2024.106846>

Sarvalkar, P. D., Kamble, S. S., Powar, P. S., Kakade, S. S., Jamadar, A. S., Thounaojam, P., Patil, M. S., Kalake, S. V., Nimbalkar, M. S., & Sharma, K. K. K. (2024b).

Synthesized rGO/f-MWCNT-Architected 1-D ZnO Nanocomposites for Azo Dyes Adsorption, Photocatalytic Degradation, and Biological Applications. *Catalysis Communications*, 187(February), 106846. <https://doi.org/10.1016/j.catcom.2024.106846>

Sasikala, S. P., Nibila, T. A., Babitha, K. B., Peer Mohamed, A. A., & Solaiappan, A. (2019). Competitive Photo-Degradation Performance of ZnO Modified Bentonite Clay in Water Containing Both Organic and Inorganic Contaminants. *Sustainable Environment Research*, 1(1), 1–12. <https://doi.org/10.1186/s42834-019-0001-z>

Setiabudi, A., Hardian, R., & Muzakir, A. (2012). *Karakterisasi Material; Prinsip dan Aplikasinya dalam Penelitian Kimia*. UPI PRESS.

Sevastaki, M., Papadakis, V. M., Romanitan, C., Sucheai, M. P., & Kenanakis, G. (2021). Photocatalytic Properties of Eco-Friendly ZnO Nanostructures On 3D-Printed Polylactic Acid Scaffolds. *Nanomaterials*, 11(1), 1–13. <https://doi.org/10.3390/nano11010168>

Sheikhi, S., Aliannezhadi, M., & Tehrani, F. S. (2023). The Effect of PEGylation On Optical and Structural

Properties of ZnO Nanostructures for Photocatalyst and Photodynamic Applications. *Materials Today Communications*, 34, 105103. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.105103>

Shekhar, N., & Mondal, A. (2024). Synthesis, Properties, Environmental Degradation, Processing, and Applications of Polylactic Acid (PLA): an Overview. *Polymer Bulletin*, 81, 11421–11457. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s00289-024-05252-7>

Singh, A., Srivastava, A., Tripathi, A., & Dutt, N. N. (2016). Optimization of Brilliant Green Dye Removal Efficiency by Electrocoagulation Using Response Surface Methodology. *World Journal of Environmental Engineering*, Vol. 4, 2016, Pages 23-29, 4(2), 23–29. <https://doi.org/10.12691/wjee-4-2-1>

Singh, A., Yadav, K., Thakur, P., Wan, F., Ravelo, B., & Thakur, A. (2024). Review on the Amelioration of ZnO and Its Composites: Synthesis and Applications. *Indian Journal of Physics*, 24. <https://doi.org/10.1007/s12648-024-03181-9>

Slamet, A., Yulikasari, A., Nurhayati, E., Xaverius, F., & Cornelio, F. (2021). Pengaruh Cahaya Ambient

Terhadap Efektivitas Penyisihan Rhodamine B Menggunakan Material Komposit Spent Bleaching Earth-ZnO. *Jurnal Purifikasi*, 20(2), 58–63.
<https://doi.org/10.12962/j25983806.v20.i2.438>

Smith, B. C. (2011). Fundamentals of Fourier Transform Infrared Spectroscopy, Taylor & Francis Group. In *Taylor & Francis Group* (Second Edi). Taylor & Francis Group.
<http://medcontent.metapress.com/index/A65RM03P4874243N.pdf>
<http://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-0-387-69008-7.pdf>

Stanciu, N. V., Stan, F., Sandu, I. L., Fetecau, C., & Turcanu, A. M. (2021). Thermal, Rheological, Mechanical, and Electrical Properties of Polypropylene/Multi-Walled Carbon Nanotube Nanocomposites. *Polymers*, 13(2), 1–22. <https://doi.org/10.3390/polym13020187>

Sulania, I., Karn, R. K., Fiutowski, J., Leissner, T., Goszczak, A., Chamanehpour, E., Jayarathna, J. A. A. L., & Mishra, Y. K. (2024). Novel 3D Composite for Efficient Photocatalysis in Environmental Remediation. *Scientific Reports*, 14(1), 1–11.
<https://doi.org/10.1038/s41598-024-68840-7>

Sun, Y., Wang, X., Xia, S., & Zhao, J. (2022). Cu(II) Adsorption

- on Poly(Lactic Acid) Microplastics: Significance of Microbial Colonization and Degradation. *Chemical Engineering Journal*, 429, 132306. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.132306>
- Taghizadeh, M. T., Siyahi, V., & Ashassi-Sorkhabi, H. (2021). Visible-Light Photocatalytic Degradation of Textile Dye by Recyclable and Recoverable AgBr-ZnO/Chitosan Beads. *Polymer Bulletin*, 78(7), 3869–3887. <https://doi.org/10.1007/s00289-020-03298-x>
- Taheri, M., A., H., G., & M.R. (2017). Formation Nanostructures Alloys by of Urchin-Like ZnO Sol-Gel Electrophoretic Deposition for Photocatalytic Application. *Journal of and Compounds*, 291–301. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.07.173>
- Tan, B., Huang, Z., Yin, Z., Min, X., Liu, Y., Wu, X., & Fang, M. (2016). Preparation and thermal properties of shape-stabilized composite phase change materials based on polyethylene glycol and porous carbon prepared from potato. *RSC Advances*, 6(19), 15821–15830. <https://doi.org/10.1039/c5ra25685b>
- Tang, Z., Fan, F., Chu, Z., Fan, C., & Qin, Y. (2020). Barrier properties and characterizations of poly(lactic

Acid)/ZnO nanocomposites. *Molecules*, 25(6), 1–12.
<https://doi.org/10.3390/molecules25061310>

Tarhini, A. A., & Tehrani-Bagha, A. R. (2019). Graphene-Based Polymer Composite Films with Enhanced Mechanical Properties and Ultra-High In-Plane Thermal Conductivity. *Composites Science and Technology*, 184, 107797.
<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2019.107797>

Tesalonika, L., & Manurung, T. W. (2025). *Aplikasi Membran Nanofiltrasi Dalam Pengolahan Limbah Cair Pewarna Tekstil Industri Batik : Tinjauan Literatur*. 03(02), 78–84.

Tian, J., Kou, C., Zhang, G., Gu, M., Chen, L., Xu, H., & Du, Q. (2025). Surface Hydroxyl Synergistic oxygen vacancy to Activate Peroxydisulfate for Enhancing the Photocatalytic Performance of Fe-ZnO/PEG-BiOCl: Catalytic and Mechanistic Study. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 709(P1), 136083.
<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.136083>

Tjahjanti, P. H. (2018). Buku Ajar Teori Dan Aplikasi Material Komposit Dan Polimer. In S. B. Sartika & M. T. Multazam (Eds.), *Buku Ajar Teori Dan Aplikasi Material*

Komposit Dan Polimer. UMSIDA PRESS.

<https://doi.org/10.21070/2019/978-602-5914-27-0>

Tseng, T. K., Lin, Y. S., Chen, Y. J., & Chu, H. (2010). A Review of Photocatalysts Prepared by Sol-Gel Method for VOCs Removal. *International Journal of Molecular Sciences*, 11(6), 2336–2361.
<https://doi.org/10.3390/ijms11062336>

Vaggar, G. B., & Kamate, S. C. (2020). Thermal Property Characterization for Enhancement of Thermal Conductivity of Hybrid Polymer Composites. *Materials Today: Proceedings*, 20, 208–212.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.055>

Varudkar, H. A., Umadevi, G., Nagaraju, P., Dargad, J. S., & Mote, V. D. (2020). Fabrication of Al-Doped ZnO Nanoparticles and Their Application as a Semiconductor-Based Gas Sensor for the Detection of Ammonia. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 31(15), 12579–12585.
<https://doi.org/10.1007/s10854-020-03808-7>

Wang, S., Wu, R., Zhang, J., Leng, Y., & Li, Q. (2021). PLA/PEG/MWCNT composites with improved processability and mechanical properties. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 60(4), 430–439.

<https://doi.org/10.1080/25740881.2020.1811324>

Wang, W., Ye, G., Bian, X., Lin, P., Wang, D., & Wang, X. (2024). Enhanced Photocatalytic Degradation of Polylactide (PLA) Through TiO₂-Based Up-Conversion Nanoparticles. *Polymer Degradation and Stability*, 228(April), 110927. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2024.110927>

Wong, L. W., Mak, S. H., Goh, B. H., & Lee, W. L. (2023). The Convergence of FTIR and EVs: Emergence Strategy for Non-Invasive Cancer Markers Discovery. *Diagnostics*, 13(1). <https://doi.org/10.3390/diagnostics13010022>

Wu, H., & Drzal, L. T. (2016). Multifunctional Highly Aligned Graphite Nanoplatelet-Polyether Imide Composite in Film Form. *Materials Chemistry and Physics*, 182, 110–118. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2016.07.011>

Yan, Y., Zhang, B., Wang, J., Cao, C., & Yan, F. (2024). MWCNT–Polyimide Fiber-Reinforced Composite for High-Temperature Tribological Applications. *Coatings*, 14, 181. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/coatings14020181>

Yang, X. M., Yin, G. Z., Amorós, O. Z., Hernández, M. A., de la Vega, J., & Torralba, J. M. (2023). Polydopamine surface functionalized submicron ZnO for broadening the processing window of 3D printable PLA composites. *Journal of Polymer Research*, 30(5), 1–13. <https://doi.org/10.1007/s10965-023-03540-w>

Younus, M. M., Naguib, H. M., Fekry, M., & Elsayy, M. A. (2023). Pushing the Limits of PLA by Exploring the Power of MWCNTs In Enhancing Thermal, Mechanical Properties, and Weathering Resistance. *Scientific Reports*, 13(1), 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-43660-3>

Youssef, P. (2016). *Novel Dispersion Technique of Carbon Nanotube in Combination with Nano Silica in Cement Composites to Enhance Its Mechanical Properties*. June. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4514.7763>

Zahedah, R., & Dinç, B. (2025). Advancing bone tissue engineering: multi-walled carbon nanotube-poly(lactic acid) composites for enhanced regeneration. *Composite Interfaces*, 32(3), 399–419. <https://doi.org/10.1080/09276440.2025.2450158>

Zhang, T., Sun, J., Ren, L., Yao, Y., Wang, M., Zeng, X., Sun, R., Xu, J. Bin, & Wong, C. P. (2019). Nacre-Inspired

Polymer Composites With High Thermal Conductivity and Enhanced Mechanical Strength. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 121(November 2018), 92–99.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.03.017>

Zhang, Y., Zhang, Z., Yang, J., Yue, Y., & Zhang, H. (2022). A Review of Recent Advances in Superhydrophobic Surfaces and Their Applications in Drag Reduction and Heat Transfer. *Nanomaterials*, 12(1).
<https://doi.org/10.3390/nano12010044>

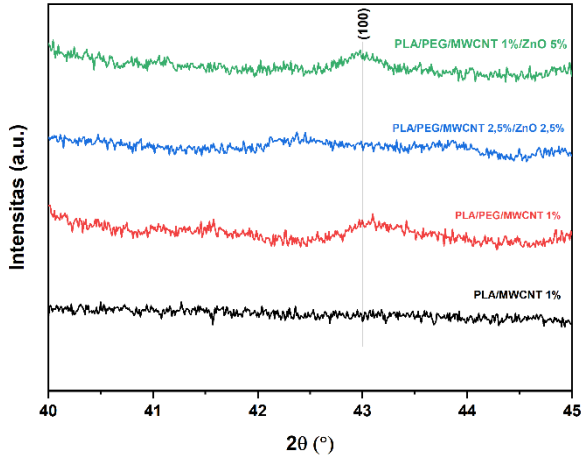
Zhao, T., & Jiang, L. (2018). Contact Angle Measurement of Natural Materials. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 161, 324–330.
<https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2017.10.056>

Zurweni, Z., & Sanova, A. (2023). Development of UV-VIS Spectrophotometer Virtual Laboratory Media for Instrumental Analytical Chemistry Digital Practicum. *Formatif: Jurnal Ilmiah Pendidikan MIPA*, 13(1), 89–100. <https://doi.org/10.30998/formatif.v13i1.17069>

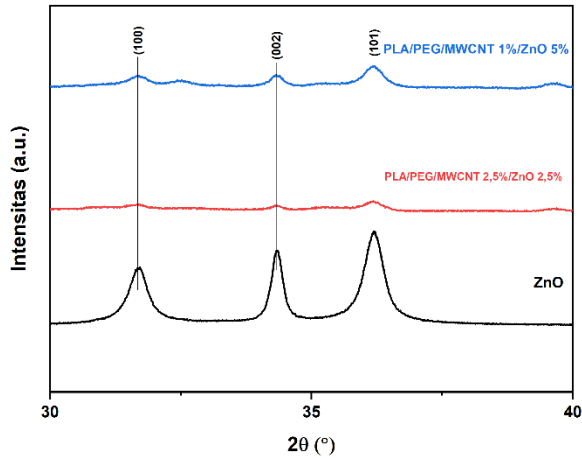
LAMPIRAN

Lampiran 1 Perbesaran Hasil Uji XRD

1. Perbesaran puncak difraksi dari MWCNT



2. Perbesaran puncak difraksi dari ZnO



Lampiran 2 Perhitungan Nilai d (Å)

Rumus:

$$d = \frac{n\lambda}{2 \sin \theta}$$

$$\lambda = 1,5406$$

$$n = 1$$

Sampel	2 theta	Theta	d (Å)	Rata-rata
A (PLA/MWCNT 1%)	16,771	8,386	5,282	4,962
	19,103	9,552	4,642	
B (PLA/PEG)	16,827	8,414	5,265	4,267
	19,221	9,611	4,614	
	23,374	11,687	3,803	
	26,294	13,147	3,387	
C (PLA/PEG/MWCNT 1%)	16,869	8,435	5,252	4,251
	19,312	9,656	4,592	
	23,467	11,734	3,788	
	26,406	13,203	3,373	
D (PLA/PEG/MWCNT 2,5%/ZnO 2,5%)	16,687	8,344	5,308	3,587
	19,093	9,547	4,645	
	23,243	11,622	3,824	
	26,165	13,083	3,403	
	31,658	15,829	2,824	
	34,198	17,099	2,620	
E (PLA/PEG/MWCNT 1%/ZnO 5%)	36,162	18,081	2,482	2,966
	16,629	8,314	5,327	
	19,027	9,514	4,660	
	23,109	11,554	3,846	
	26,099	13,049	3,412	
	31,599	15,800	2,829	
	34,268	17,134	2,615	

	36,106	18,053	2,486	
	56,479	28,239	1,628	
	62,738	31,369	1,480	
	68,000	34,000	1,378	

1. Sampel A

Peak 1

$$d = \frac{n\lambda}{2 \sin \theta} = \frac{1,15406}{2 \sin 8,386} = 5,282 \text{ \AA}$$

Peak 2

$$d = \frac{n\lambda}{2 \sin \theta} = \frac{1,5406}{2 \sin 9,552} = 4,642 \text{ \AA}$$

2. Sampel B

Peak 1

$$d = \frac{n\lambda}{2 \sin \theta} = \frac{1,5406}{2 \sin 8,414} = 5,265 \text{ \AA}$$

Peak 2

$$d = \frac{n\lambda}{2 \sin \theta} = \frac{1,5406}{2 \sin 9,611} = 4,614 \text{ \AA}$$

Peak 3

$$d = \frac{n\lambda}{2 \sin \theta} = \frac{1,5406}{2 \sin 11,687} = 3,803 \text{ \AA}$$

Peak 4

$$d = \frac{n\lambda}{2 \sin \theta} = \frac{1,5406}{2 \sin 13,147} = 3,387 \text{ \AA}$$

3. Sampel C

Peak 1

$$d = \frac{n\lambda}{2 \sin \theta} = \frac{1,5406}{2 \sin 8,435} = 5,252 \text{ \AA}$$

Peak 2

$$d = \frac{n\lambda}{2 \sin \theta} = \frac{1,5406}{2 \sin 9,656} = 4,592 \text{ \AA}$$

Peak 3

$$d = \frac{n\lambda}{2 \sin \theta} = \frac{1,5406}{2 \sin 11,734} = 3,788 \text{ \AA}$$

Peak 4

$$d = \frac{n\lambda}{2 \sin \theta} = \frac{1,5406}{2 \sin 13,203} = 3,373 \text{ \AA}$$

4. Sampel D

Peak 1

$$d = \frac{n\lambda}{2 \sin \theta} = \frac{1,5406}{2 \sin 8,344} = 5,308 \text{ \AA}$$

Peak 2

$$d = \frac{n\lambda}{2 \sin \theta} = \frac{1,5406}{2 \sin 9,547} = 5,645 \text{ \AA}$$

Peak 3

$$d = \frac{n\lambda}{2 \sin \theta} = \frac{1,5406}{2 \sin 11,622} = 3,824 \text{ \AA}$$

Peak 4

$$d = \frac{n\lambda}{2 \sin \theta} = \frac{1,5406}{2 \sin 13,083} = 3,403 \text{ \AA}$$

Peak 5

$$d = \frac{n\lambda}{2 \sin \theta} = \frac{1,5406}{2 \sin 15,829} = 2,824 \text{ \AA}$$

Peak 6

$$d = \frac{n\lambda}{2 \sin \theta} = \frac{1,5406}{2 \sin 17,099} = 2,620 \text{ \AA}$$

Peak 7

$$d = \frac{n\lambda}{2 \sin \theta} = \frac{1,5406}{2 \sin 18,081} = 2,482 \text{ \AA}$$

5. Sampel E

Peak 1

$$d = \frac{n\lambda}{2 \sin \theta} = \frac{1,5406}{2 \sin 8,314} = 5,327 \text{ \AA}$$

Peak 2

$$d = \frac{n\lambda}{2 \sin \theta} = \frac{1,5406}{2 \sin 9,514} = 4,660 \text{ \AA}$$

Peak 3

$$d = \frac{n\lambda}{2 \sin \theta} = \frac{1,5406}{2 \sin 11,554} = 3,846 \text{ \AA}$$

Peak 4

$$d = \frac{n\lambda}{2 \sin \theta} = \frac{1,5406}{2 \sin 13,049} = 3,412 \text{ \AA}$$

Peak 5

$$d = \frac{n\lambda}{2 \sin \theta} = \frac{1,5406}{2 \sin 15,800} = 2,829 \text{ \AA}$$

Peak 6

$$d = \frac{n\lambda}{2 \sin \theta} = \frac{1,5406}{2 \sin 17,134} = 2,615 \text{ \AA}$$

Peak 7

$$d = \frac{n\lambda}{2 \sin \theta} = \frac{1,5406}{2 \sin 18,053} = 2,486 \text{ \AA}$$

Peak 8

$$d = \frac{n\lambda}{2 \sin \theta} = \frac{1,5406}{2 \sin 28,239} = 1,628 \text{ \AA}$$

Peak 9

$$d = \frac{n\lambda}{2 \sin \theta} = \frac{1,5406}{2 \sin 31,369} = 1,480 \text{ \AA}$$

Peak 10

$$d = \frac{n\lambda}{2 \sin \theta} = \frac{1,5406}{2 \sin 34,000} = 1,378 \text{ \AA}$$

Lampiran 3 Perhitungan Ukuran Kristal (D)

Rumus:

$$D = K \frac{\lambda}{\beta \cos \theta}$$

$$K = 0,9$$

$$\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$$

$$\beta = \text{FWHM (rad)}$$

Sampel	2 theta	FWHM	D (nm)	Rata-rata
A (PLA/MWCNT 1%)	16,771	0,511	15,712	8,214
	19,103	11,253	0,716	
B (PLA/PEG)	16,827	0,570	14,078	17,469
	19,221	0,326	24,695	
	23,374	0,783	10,361	
	26,294	0,393	20,740	
C (PLA/PEG/MWCNT 1%)	16,869	0,543	14,793	18,941
	19,312	0,307	26,247	
	23,467	0,776	10,460	
	26,406	0,336	24,365	
D (PLA/PEG/MWCNT 2,5%/ZnO 2,5%)	16,687	0,530	15,136	20,804
	19,093	0,293	27,538	
	23,243	0,766	10,588	
	26,165	0,309	26,414	
	31,658	0,366	22,569	
	34,198	0,384	21,632	
	36,162	0,384	21,750	
	16,629	0,641	12,528	15,597
	19,027	0,386	20,870	

E (PLA/PEG/MWCNT 1%/ZnO 5%)	23,109	0,857	9,461	
	26,099	0,323	25,230	
	31,599	0,583	14,172	
	34,268	0,370	22,474	
	36,106	0,523	15,971	
	56,479	0,548	16,468	
	62,738	0,672	13,841	
	68,000	1,935	4,953	

1. Sampel A

Peak 1

$$D = 0,9 \frac{1,5406}{0,511 \cos 8,386} = 82,14 \text{ \AA} = 8,214 \text{ nm}$$

Peak 2

$$D = 0,9 \frac{1,5406}{11,253 \cos 9,552} = 174,69 \text{ \AA} = 17,469 \text{ nm}$$

2. Sampel B

Peak 1

$$D = 0,9 \frac{1,5406}{0,570 \cos 8,414} = 140,78 \text{ \AA} = 14,078 \text{ nm}$$

Peak 2

$$D = 0,9 \frac{1,5406}{0,326 \cos 9,611} = 246,95 \text{ \AA} = 24,695 \text{ nm}$$

Peak 3

$$D = 0,9 \frac{1,5406}{0,783 \cos 11,687} = 103,61 \text{ \AA} = 10,361 \text{ nm}$$

Peak 4

$$D = 0,9 \frac{1,5406}{0,393 \cos 13,147} = 207,40 \text{ \AA} = 20,740 \text{ nm}$$

3. Sampel C

Peak 1

$$D = 0,9 \frac{1,5406}{0,543 \cos 8,435} = 147,93 \text{ \AA} = 14,793 \text{ nm}$$

Peak 2

$$D = 0,9 \frac{1,5406}{0,307 \cos 9,656} = 262,47 \text{ \AA} = 26,247 \text{ nm}$$

Peak 3

$$D = 0,9 \frac{1,5406}{0,776 \cos 11,734} = 104,60 \text{ \AA} = 10,460 \text{ nm}$$

Peak 4

$$D = 0,9 \frac{1,5406}{0,336 \cos 13,203} = 242,65 \text{ \AA} = 24,265 \text{ nm}$$

4. Sampel D

Peak 1

$$D = 0,9 \frac{1,5406}{0,530 \cos 8,344} = 151,36 \text{ \AA} = 15,136 \text{ nm}$$

Peak 2

$$D = 0,9 \frac{1,5406}{0,293 \cos 9,547} = 275,38 \text{ \AA} = 27,538 \text{ nm}$$

Peak 3

$$D = 0,9 \frac{1,5406}{0,766 \cos 11,622} = 105,88 \text{ \AA} = 10,588 \text{ nm}$$

Peak 4

$$D = 0,9 \frac{1,5406}{0,309 \cos 13,083} = 264,14 \text{ \AA} = 26,414 \text{ nm}$$

Peak 5

$$D = 0,9 \frac{1,5406}{0,366 \cos 15,829} = 225,69 \text{ \AA} = 22,569 \text{ nm}$$

Peak 6

$$D = 0,9 \frac{1,5406}{0,384 \cos 17,099} = 216,32 \text{ \AA} = 21,632 \text{ nm}$$

Peak 7

$$D = 0,9 \frac{1,5406}{0,384 \cos 18,081} = 217,50 \text{ \AA} = 21,750 \text{ nm}$$

5. Sampel E

Peak 1

$$D = 0,9 \frac{1,5406}{0,641 \cos 8,314} = 125,28 \text{ \AA} = 12,528 \text{ nm}$$

Peak 2

$$D = 0,9 \frac{1,5406}{0,386 \cos 9,514} = 208,70 \text{ \AA} = 20,870 \text{ nm}$$

Peak 3

$$D = 0,9 \frac{1,5406}{0,857 \cos 11,554} = 94,61 \text{ \AA} = 9,461 \text{ nm}$$

Peak 4

$$D = 0,9 \frac{1,5406}{0,323 \cos 13,049} = 252,30 \text{ \AA} = 25,230 \text{ nm}$$

Peak 5

$$D = 0,9 \frac{1,5406}{0,583 \cos 15,800} = 141,72 \text{ \AA} = 14,172 \text{ nm}$$

Peak 6

$$D = 0,9 \frac{1,5406}{0,370 \cos 17,134} = 224,74 \text{ \AA} = 22,474 \text{ nm}$$

Peak 7

$$D = 0,9 \frac{1,5406}{0,523 \cos 18,053} = 159,71 \text{ \AA} = 15,971 \text{ nm}$$

Peak 8

$$D = 0,9 \frac{1,5406}{0,548 \cos 28,239} = 164,68 \text{ \AA} = 16,468 \text{ nm}$$

Peak 9

$$D = 0,9 \frac{1,5406}{0,672 \cos 31,369} = 138,41 \text{ \AA} = 13,841 \text{ nm}$$

Peak 10

$$D = 0,9 \frac{1,5406}{1,935 \cos 34,000} = 49,53 \text{ \AA} = 4,953 \text{ nm}$$

Lampiran 4 Perhitungan Derajat Kristalinitas (X_c)

Rumus:

$$X_c = \frac{A_c}{A_c + A_a}$$

A_c = luas puncak difraksi kristalin

A_a = luas puncak difraksi amorf

Sampel	A_c	$A_c + A_a$	X_c (%)
A (PLA/MWCNT 1%)	13742,0	55503,1	24,8
B (PLA/PEG)	24874,7	66881,2	37,2
C (PLA/PEG/MWCNT 1%)	32427,5	77473,6	41,9
D(PLA/PEG/MWCNT 2,5%/ZnO 2,5%)	20967,8	46336,0	45,3
E (PLA/PEG/MWCNT 1%/ZnO 5%)	24110,3	62528,1	38,6

1. Sampel A

$$X_c = \frac{13742,0}{55503,1} = 24,8\%$$

2. Sampel B

$$X_c = \frac{24874,7}{66881,2} = 37,2\%$$

3. Sampel C

$$X_c = \frac{32427,5}{77473,6} = 41,9\%$$

4. Sampel D

$$X_c = \frac{20967,8}{46336,0} = 45,3\%$$

5. Sampel E

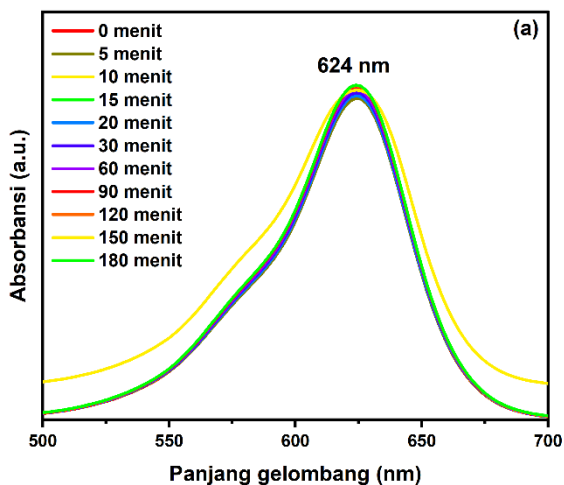
$$X_c = \frac{24110,3}{62528,1} = 38,6\%$$

Lampiran 5 Perhitungan dan Grafik Absorbansi Hasil Fotokatalisis

1. Variasi Waktu Kontak

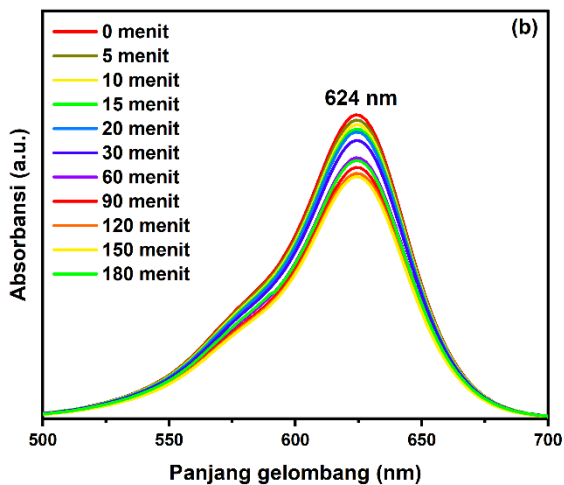
a. Sampel A (PLA/MWCNT 1%)

waktu	absorbansi		rata-rata	konsentrasi	% degradasi
	Pengukuran 1	Pengukuran 2			
-30	2.204	2.204	2.204	15.030	
0	2.295	2.297	2.296	15.648	0
5	2.315	2.297	2.306	15.716	-0.430
10	2.274	2.277	2.276	15.510	0.881
15	2.265	2.270	2.268	15.457	1.225
20	2.263	2.269	2.266	15.447	1.289
30	2.269	2.272	2.271	15.477	1.096
60	2.362	2.363	2.363	16.095	-2.858
90	2.380	2.381	2.381	16.217	-3.631
120	2.397	2.392	2.395	16.311	-4.233
150	2.387	2.386	2.387	16.257	-3.889
180	2.406	2.400	2.403	16.368	-4.598



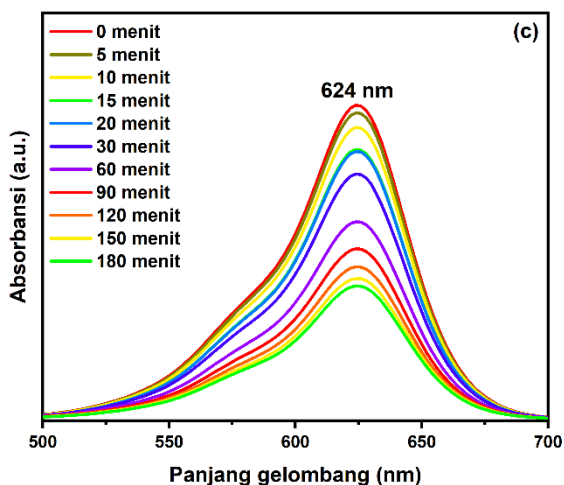
b. Sampel B (PLA/PEG)

waktu	absorbansi		rata-rata	konsentrasi	% degradasi
	Pengukuran 1	Pengukuran 2			
-30	2.201	2.201	2.201	15.009	
0	2.012	2.005	2.009	13.715	0
5	1.986	1.978	1.982	13.537	1.299
10	1.955	1.948	1.952	13.332	2.795
15	1.925	1.919	1.922	13.133	4.241
20	1.899	1.891	1.895	12.952	5.565
30	1.849	1.843	1.846	12.622	7.968
60	1.728	1.725	1.727	11.818	13.828
90	1.663	1.664	1.664	11.395	16.917
120	1.625	1.628	1.627	11.146	18.731
150	1.603	1.604	1.604	10.991	19.859
180	1.71	1.75	1.730	11.842	13.656



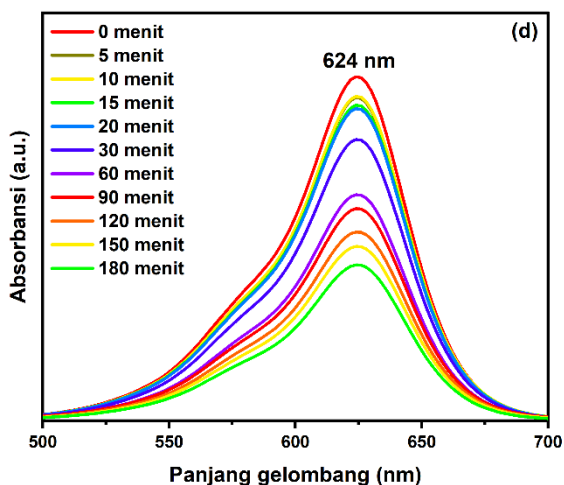
c. Sampel C (PLA/PEG/MWCNT 1%)

waktu	absorbansi		rata-rata	konsentrasi	% degradasi
	Pengukuran 1	Pengukuran 2			
-30	2.21	2.21	2.210	15.070	
0	1.16	1.161	1.161	8.012	0
5	1.133	1.135	1.134	7.834	2.224
10	1.079	1.08	1.080	7.467	6.799
15	0.998	0.998	0.998	6.919	13.639
20	0.99	0.993	0.992	6.876	14.185
30	0.907	0.907	0.907	6.307	21.277
60	0.732	0.745	0.739	5.174	35.421
90	0.632	0.633	0.633	4.461	44.318
120	0.566	0.571	0.569	4.031	49.689
150	0.523	0.526	0.525	3.735	53.383
180	0.492	0.496	0.494	3.530	55.943



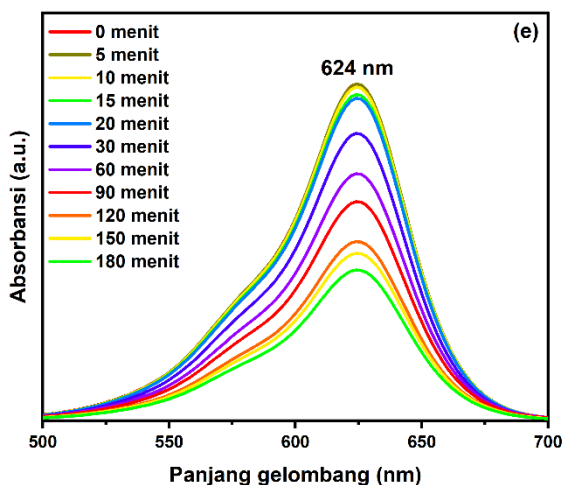
d. Sampel D (PLA/PEG/MWCNT 2,5%/ZnO 2,5%)

waktu	absorbansi		rata-rata	konsentrasi	% degradasi
	Pengukuran 1	Pengukuran 2			
-30	2.22	2.22	2.220	15.137	
0	1.096	1.096	1.096	7.578	0
5	1.03	1.03	1.030	7.134	5.857
10	1.034	1.04	1.037	7.182	5.236
15	1.006	1.016	1.011	7.007	7.543
20	0.992	0.995	0.994	6.889	9.096
30	0.894	0.896	0.895	6.227	17.837
60	0.721	0.721	0.721	5.056	33.277
90	0.676	0.675	0.676	4.751	37.315
120	0.602	0.602	0.602	4.256	43.837
150	0.556	0.556	0.556	3.947	47.919
180	0.497	0.497	0.497	3.550	53.155



e. Sampel E (PLA/PEG/MWCNT 1%/ZnO 5%)

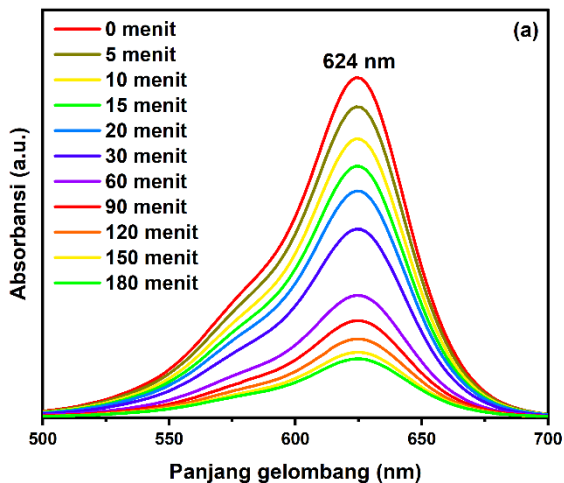
waktu	absorbansi		rata-rata	konsentrasi	% degradasi
	Pengukuran 1	Pengukuran 2			
-30	2.216	2.216	2.216	15.110	
0	1.817	1.815	1.816	12.420	0
5	1.817	1.818	1.818	12.430	-0.081
10	1.797	1.8	1.799	12.303	0.948
15	1.76	1.761	1.761	12.047	3.005
20	1.739	1.735	1.737	11.889	4.277
30	1.554	1.55	1.552	10.645	14.294
60	1.333	1.324	1.329	9.142	26.396
90	1.182	1.173	1.178	8.126	34.571
120	0.971	0.967	0.969	6.724	45.861
150	0.91	0.903	0.907	6.304	49.245
180	0.817	0.813	0.815	5.689	54.199



2. Variasi Jumlah Katalis

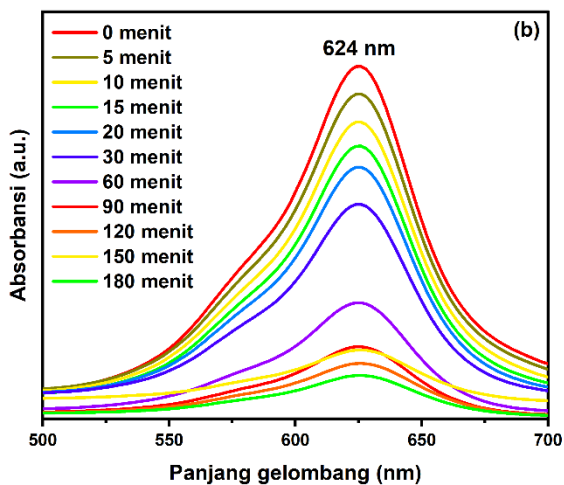
a. Sampel PLA/PEG/MWCNT 1%

waktu	absorbansi		rata-rata	konsentrasi	% degradasi
	Pengukuran 1	Pengukuran 2			
-30	2.206	2.206	2.206	15.043	
0	0.882	0.876	0.879	6.119	0
5	0.803	0.801	0.802	5.601	8.462
10	0.718	0.716	0.717	5.030	17.804
15	0.648	0.651	0.650	4.576	25.223
20	0.584	0.585	0.585	4.139	32.366
30	0.486	0.486	0.486	3.476	43.192
60	0.315	0.315	0.315	2.326	61.985
90	0.25	0.244	0.247	1.869	69.458
120	0.203	0.2	0.202	1.563	74.459
150	0.169	0.173	0.171	1.358	77.811
180	0.152	0.154	0.153	1.237	79.789



b. Sampel PLA/PEG/MWCNT 2,5%/ZnO 2,5%

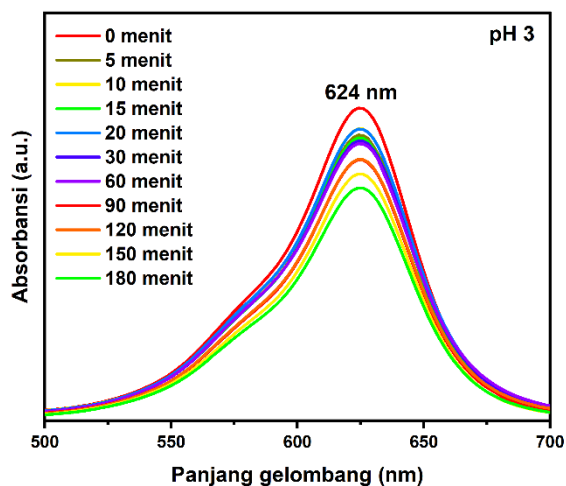
waktu	absorbansi		rata-rata	konsentrasi	% degradasi
	Pengukuran 1	Pengukuran 2			
-30	2.203	2.203	2.203	15.023	
0	0.693	0.692	0.693	4.865	0
5	0.638	0.635	0.637	4.488	7.741
10	0.583	0.583	0.583	4.128	15.137
15	0.536	0.536	0.536	3.812	21.634
20	0.494	0.494	0.494	3.530	27.440
30	0.422	0.422	0.422	3.046	37.393
60	0.228	0.227	0.228	1.738	64.280
90	0.142	0.142	0.142	1.163	76.099
120	0.109	0.111	0.110	0.948	80.523
150	0.135	0.141	0.138	1.136	76.652
180	0.085	0.086	0.086	0.783	83.909



3. Variasi pH Larutan

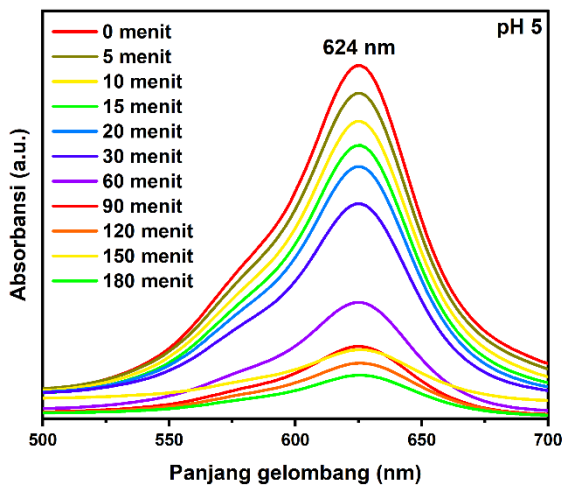
a. pH 3

waktu	absorbansi		rata-rata	konsentrasi	% degradasi
	Pengukuran 1	Pengukuran 2			
-30	2.219	2.219	2.219	15.130	
0	0.613	0.614	0.614	4.334	0
5	0.557	0.56	0.559	3.964	8.535
10	0.573	0.573	0.573	4.061	6.285
15	0.553	0.555	0.554	3.933	9.233
20	0.572	0.574	0.573	4.061	6.285
30	0.546	0.549	0.548	3.890	10.242
60	0.538	0.543	0.541	3.843	11.328
90	0.509	0.511	0.510	3.638	16.061
120	0.512	0.512	0.512	3.651	15.751
150	0.483	0.484	0.484	3.459	20.174
180	0.457	0.46	0.459	3.291	24.053



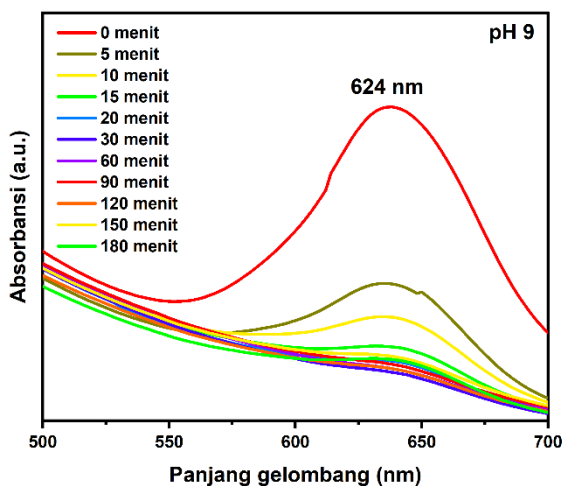
b. pH 5

waktu	absorbansi		rata-rata	konsentrasi	% degradasi
	Pengukuran 1	Pengukuran 2			
-30	2.22	2.22	2.220	15.137	
0	1.096	1.096	1.096	7.578	0
5	1.03	1.03	1.030	7.134	7.741
10	1.034	1.04	1.037	7.182	15.137
15	1.006	1.016	1.011	7.007	21.634
20	0.992	0.995	0.994	6.889	27.440
30	0.894	0.896	0.895	6.227	37.393
60	0.721	0.721	0.721	5.056	64.280
90	0.676	0.675	0.676	4.751	76.099
120	0.602	0.602	0.602	4.256	80.523
150	0.556	0.556	0.556	3.947	76.652
180	0.497	0.497	0.497	3.550	83.909



c. pH 9

waktu	absorbansi		rata-rata	konsentrasi	% degradasi
	Pengukuran 1	Pengukuran 2			
-30	2.232	2.232	2.232	15.218	
0	0.383	0.372	0.378	2.746	0
5	0.227	0.227	0.227	1.734	36.851
10	0.198	0.196	0.197	1.533	44.197
15	0.172	0.172	0.172	1.364	50.318
20	0.161	0.16	0.161	1.287	53.134
30	0.152	0.152	0.152	1.230	55.215
60	0.156	0.156	0.156	1.257	54.236
90	0.16	0.159	0.160	1.280	53.379
120	0.155	0.156	0.156	1.254	54.358
150	0.166	0.164	0.165	1.317	52.032
180	0.161	0.161	0.161	1.291	53.012



4. Kinetika Reaksi

1. Nilai dari perhitungan $-\ln(C_t/C_0)$

Waktu	PLA/MWCNT 1%	PLA/PEG	PLA/PEG/ MWCNT 1%	PLA/PEG/ MWCNT 2,5%/ZnO 2,5%	PLA/PEG/ MWCNT 1%/ZnO 5%
0	0	0	0	0	0
5	-0.004	0.013	0.023	0.062	-0.001
10	0.009	0.029	0.072	0.055	0.010
15	0.012	0.044	0.151	0.081	0.031
20	0.013	0.058	0.157	0.098	0.044
30	0.011	0.084	0.246	0.203	0.157
60	-0.029	0.151	0.452	0.419	0.313
90	-0.036	0.188	0.607	0.484	0.433
120	-0.042	0.211	0.714	0.599	0.628
150	-0.039	0.225	0.794	0.679	0.695
180	-0.046	0.149	0.854	0.791	0.801

Sampel	Intercept	Slope	C_0	K	R^2
PLA/MWCNT 1%	0.00759	-3.43E- 04	0.00759	-3.40E- 04	0.7971
PLA/PEG	0.03581	0.00112	1.00762	0.00108	0.7423
PLA/PEG/M WCNT 1%	0.06228	0.00498	1.06426	0.00468	0.9594
PLA/PEG/M WCNT 2,5%/ZnO 2,5%	0.04103	0.00444	1.04188	0.00426	0.9717
PLA/PEG/M WCNT 1%/ZnO 5%	-0.01453	0.00481	0.98558	0.00488	0.987

5. Kinetika Adsorpsi

Kinetika Pseudo-first order

waktu	PLA/MWCNT	PLA/PEG	PLA/PEG/MWCNT
-30	#NUM!	0.310179835	1.511514812
0	#NUM!	-0.21017471	0.417014501
5	#NUM!	-0.30885937	0.365521825
10	#NUM!	-0.43598138	0.250476812
15	#NUM!	-0.5765214	0.049184496
20	#NUM!	-0.72514603	0.031240606
30	#NUM!	-1.06876541	-0.237130522
60	#NUM!	#NUM!	-1.188642689
90	-2.96171002	#NUM!	#NUM!
120	-2.38634588	#NUM!	#NUM!
150	-2.67402795	#NUM!	#NUM!
180	-2.15077981	-4.59931881	#NUM!

Kinetika Pseudo-second order

waktu	PLA/MWCNT	PLA/PEG	PLA/PEG/MWCNT
-30	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
0	0	0	0
5	-17.0567647	7.944246575	1.616905204
10	-48.6654545	13.94621242	3.077912428
15	-82.1948031	18.70741935	4.306410891
20	-112.244516	22.74235294	5.711251539
30	-156.973534	29.40490141	8.011312356
60	-131.719117	43.99890411	14.18788991
90	-177.429008	58.26273488	19.85180349
120	-219.186142	72.68052219	25.43707585
150	-285.992877	87.3534728	30.9663008
180	-314.735879	132.9775796	36.49909091

Draft Skripsi Tasya Salsabila.pdf

ORIGINALITY REPORT

12%

SIMILARITY INDEX

11%

INTERNET SOURCES

4%

PUBLICATIONS

4%

STUDENT PAPERS

PRIMARY SOURCES

1	repository.its.ac.id Internet Source	2%
2	eprints.walisongo.ac.id Internet Source	1%
3	Submitted to Universitas Pendidikan Ganesha Student Paper	1%
4	es.scribd.com Internet Source	<1%
5	123dok.com Internet Source	<1%
6	www.scribd.com Internet Source	<1%
7	www.coursehero.com Internet Source	<1%
8	etheses.uin-malang.ac.id Internet Source	<1%

DAFTAR RIWAYAT HIDUP

A. Identitas Diri

Nama : Tasya Salsabila Azizah
Tempat, Tanggal lahir : Banyumas, 11 Juni 2003
Alamat : Lebak Pesawoan RT 02/RW
08, Tinggarjaya, Jatilawang,
Banyumas, Jawa Barat
No. Telepon : 081218662726
Email : tasyaazizah25@gmail.com

B. Riwayat Pendidikan

1. SMP N 1 Jatilawang (2015-2018)
2. SMA A. Wahid Hasyim Jombang (2018-2021)

Semarang, 24 Juni 2025



Tasya Salsabila Azizah
NIM. 2108026035