

**PENGARUH DOPING PERAK NITRAT (AgNO_3) PADA NANOPARTIKEL
SENG OKSIDA (ZnO) YANG DISINTESIS MENGGUNAKAN EKSTRAK
DAUN SIRIH MERAH (*Piper crocatum*) TERHADAP AKTIVITAS
ANTIBAKTERI**

(Skripsi)

Oleh

**MUHAMMAD ASRIZAL
NPM. 1917041028**



**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

**PENGARUH DOPING PERAK NITRAT (AgNO_3) PADA NANOPARTIKEL
SENG OKSIDA (ZnO) YANG DISINTESIS MENGGUNAKAN EKSTRAK
DAUN SIRIH MERAH (*Piper crocatum*) TERHADAP AKTIVITAS
ANTIBAKTERI**

Oleh

MUHAMMAD ASRIZAL

Skripsi

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA SAINS

Pada

**Jurusan Fisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Lampung**



**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENEGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

ABSTRAK

PENGARUH DOPING PERAK NITRAT (AgNO_3) PADA NANOPARTIKEL SENG OKSIDA (ZnO) YANG DISINTESIS MENGGUNAKAN EKSTRAK DAUN SIRIH MERAH (*Piper crocatum*) TERHADAP AKTIVITAS ANTIBAKTERI

Oleh

MUHAMMAD ASRIZAL

Telah dilakukan penelitian mengenai pengaruh doping perak nitrat (AgNO_3) pada nanopartikel ZnO yang disintesis menggunakan ekstrak daun sirih merah (*Piper crocatum*) terhadap aktivitas antibakteri *Escherichia coli*. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui morfologi dan karakteristik nanopartikel ZnO/Ag serta aktivitas antibakterinya. Nanopartikel ZnO/Ag disintesis dengan variasi 0 ml, 10 ml, 20 ml, dan 30 ml AgNO_3 serta dikarakterisasi menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) dan *Scanning Electron Microscopy* (SEM). Hasil menunjukkan terbentuknya struktur *wurtzite* ZnO dan keberhasilan doping Ag yang ditandai dengan munculnya fasa Ag pada sampel terdoping, serta morfologi menyerupai batuan karang. Uji antibakteri menunjukkan zona hambat sebesar 5 mm (ZnO murni dan ZnO/Ag 10 ml), 6 mm (20 ml), dan 7 mm (30 ml), dengan aktivitas tertinggi pada konsentrasi Ag 30 ml. Peningkatan aktivitas antibakteri disebabkan oleh efek sinergis antara ZnO dan Ag, sehingga ZnO/Ag berpotensi sebagai agen antibakteri ramah lingkungan.

Kata kunci: Ag, Antibakteri, Daun Sirih Merah, ZnO

ABSTRACT

EFFECT OF SILVER NITRATE (AgNO_3) DOPING ON ZINC OXIDE (ZnO) NANOPARTICLES SYNTHESISED USING RED BETEL LEAF EXTRACT (*Piper crocatum*) ON ANTIBACTERIAL ACTIVITY

By

MUHAMMAD ASRIZAL

A study has been conducted to investigate the effect of silver nitrate (AgNO_3) doping on ZnO nanoparticles synthesized using red betel leaf extract (*Piper crocatum*) on the antibacterial activity of *Escherichia coli*. This study aims to determine the morphology and characteristics of ZnO/Ag nanoparticles and their antibacterial activity. ZnO/Ag nanoparticles were synthesized with variations of 0 ml, 10 ml, 20 ml, and 30 ml of AgNO_3 and characterized using *X-Ray Diffraction* (XRD) and *Scanning Electron Microscopy* (SEM). The results showed the formation of the wurtzite structure of ZnO and the success of Ag doping as indicated by the appearance of the Ag phase in the doped sample, as well as the morphology resembling coral rock. The antibacterial test showed an inhibition zone of 5 mm (pure ZnO and ZnO/Ag 10 ml), 6 mm (20 ml), and 7 mm (30 ml), with the highest activity at an Ag concentration of 30 ml. The increase in antibacterial activity is due to the synergistic effect between ZnO and Ag, so that ZnO/Ag has the potential to be an environmentally friendly antibacterial agent.

Key words: Ag, Antibacterial, Red Betel Leaf, ZnO

Judul Skripsi : Pengaruh Doping Perak Nitrat (AgNO_3) pada Nanopartikel Seng Oksida (ZnO) yang Disintesis Menggunakan Ekstrak Daun Sirih Merah (*Piper crocatum*) terhadap Aktivitas Antibakteri

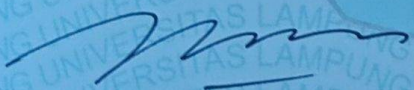
Nama Mahasiswa : Muhammad Asrizal


NPM : 1917041028

Program Studi : Fisika

Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam




Prof. Drs. Posman Manurung, M.Si., Ph.D.
NIP. 195903081991031001


Dr. Yanti Yulianti, S.Si., M.Si.
NIP. 197512192000122003

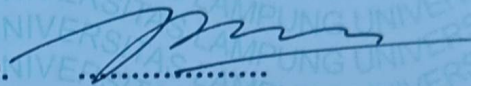
2. Ketua Jurusan Fisika


Humairoh Ratu Ayu, S.Pd., M.Si.
NIP. 199011252019032018

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

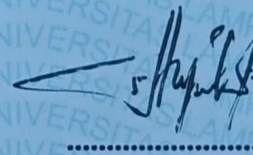
Ketua : Prof. Drs. Posman Manurung, M.Si., Ph.D.



Sekretaris : Dr. Yanti Yulianti, S.Si., M.Si.

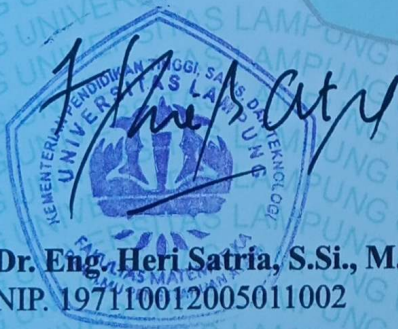


Penguji : Suprihatin, S.Si., M.Si.



2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si.
NIP. 197110012005011002



Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 3 Juni 2026

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya yang pernah dilakukan orang lain dan sepengetahuan saya tidak ada karya atau pendapat yang ditulis atau diterbitkan oleh orang lain kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini sebagaimana disebutkan dalam daftar pustaka. Selain itu, saya menyatakan pula bahwa skripsi ini dibuat oleh saya sendiri. Apabila ada pernyataan saya yang tidak benar, maka saya bersedia dikenai sanksi sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 5 Juni 2026



Muhammad Asrizal
1917041028

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama Muhammad Asrizal dilahirkan di Lampung Tengah pada tanggal 16 Juli 2001. Penulis merupakan anak kedua dari pasangan Bapak Heriyanto dan Ibu Marsiah. Penulis menyelesaikan pendidikan di Taman Kanak – Kanak Aisyiyah Bustanul Athfal pada tahun 2007, kemudian melanjutkan ke Sekolah Dasar Negeri (SDN) 1 Gaya Baru 1 pada tahun 2013, dilanjutkan ke Sekolah Menengah Pertama Negeri (SMPN) 1 Seputih Surabaya pada tahun 2016, dan Sekolah Menengah Atas Negeri (SMAN) 1 Seputih Surabaya pada tahun 2019. Penulis terdaftar sebagai mahasiswa di Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung melalui jalur SNMPTN tahun 2019.

Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif mengikuti kegiatan akademik dan non akademik. Pada tahun 2020, penulis menjadi anggota bidang sosial dan masyarakat Himpunan Mahasiswa Fisika (Himafi). Pada tahun 2023 penulis menjadi peserta Merdeka Belajar Kampus Mengajar (MBKM) pada Mitra Bangkit Akademi. Penulis melaksanakan Praktik Kerja Lapangan (PKL) di PT SUCOFINDO Provinsi Lampung dan Kuliah Kerja Nyata (KKN) Universitas Lampung di Desa Way Halom, Kec. Talang Padang, Kab Tanggamus pada tahun 2022.

MOTTO

”Allah tidak membebani seseorang melainkan sesuai kesanggupannya”

(Q.S Al-Baqarah: 286)

”Don’t limit your challenge, challenge your limit”

“It always seems impossible until it’s done”

(Nelson Mandela)

“Success is not final, failure is not fatal : it is the courage to continue that counts”

(Winston Churchill)

“The only limit to our realization of tomorrow is our doubts of today”

(Franklin D. Roosevelt)

PERSEMBAHAN

Segala puji dan syukur kepada Allah SWT. Atas rahmat dan karunia-Nya, sehingga skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik, maka ku persembahkan skripsi ini kepada:

Ayah dan Ibuku tercinta

Bapak Heriyanto dan Ibu Marsiah

Teruntuk ayahku yang senantiasa membimbing dan mengarahkan anak – anaknya untuk tidak pernah menyerah. Serta ibuku yang selalu memberikan semangat dan motivasi. Perjuangan kalian tidak akan aku sia-sia kan.

Kakak dan Adikku tersayang

Irena Nadila Fitirana dan Anggit Lestari

Yang sudah menjadi saudari sekaligus tempatku bercerita, terimakasih sudah selalu membantu, mendukung dan mendoakanku.

Almamater Tercinta

Universitas Lampung

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Allah SWT, yang selalu memberikan kemudahan, kelancaran, dan berkat karunia-Nya kepada penulis, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini yang bertempat di Laboratorium Fisika Material Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, dengan judul “Pengaruh Doping Perak Nitrat (AgNO_3) pada Nanopartikel Zeng Oksida (ZnO) yang Disintesis Menggunakan Ekstrak Daun Sirih Merah (*Piper crocatum*) Terhadap Aktivitas Antibakteri”. Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu persyaratan dalam menyelesaikan tugas akhir dan juga salah satu mata kuliah wajib di Universitas Lampung. Penulis menyadari bahwa dalam pembuatan dan penyusunan laporan ini masih terdapat banyak kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritikan dan saran yang membangun untuk penulisan berikutnya lebih baik lagi. Semoga karya penelitian ini bermanfaat bagi penulis dan pembaca.

Bandar Lampung, 5 Juni 2026

Muhammad Asrizal
NPM. 1917041028

SANAWACANA

Assalamu'alikum Warahtullahi Wabarakaatuh Puji Syukur atas kehadiran Allah SWT yang telah membarikan nikmat iman, islam dan Kesehatan sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul "Pengaruh Doping Perak Nitrat (AgNO_3) pada Nanopartikel Seng Oksida (ZnO) yang Disintesis Menggunakan Ekstrak Daun Sirih Merah (*Piper crocatum*) terhadap Aktivitas Antibakteri". Dengan segala kerendahan dan ketulusan hati, penulis mengucapkan terimakasih kepada banyak pihak yang telah membantu dan mendukung penulis dalam menyelesaikan skripsi ini. Penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Prof. Posman Manurung, M.Si., Ph.D. sebagai Dosen Pembimbing Utama yang telah memberikan bimbingan, saran, motivasi, ilmu kepada penulis selama penelitian dan penulisan skripsi.
2. Ibu Dr. Yanti Yulianti, S.Si., M.Si. sebagai Dosen Pembimbing Kedua yang telah memberikan banyak nasihat dan motivasi kepada penulis selama kepenulisan skripsi.
3. Ibu Suprihatin, S.Si., M.Si. sebagai Dosen Penguji yang telah berkenan untuk memberikan kritik dan saran kepada penulis.
4. Bapak Iqbal Firdaus, S.Si., M.Si. sebagai Dosen Pembimbing Akademik yang telah memberikan banyak nasihat dan motivasi selama penulis menempuh pendidikan di Jurusan Fisika.
5. Seluruh Dosen Jurusan Fisika atas segala ilmu yang telah diberikan selama penulis menjadi mahasiswa di Universitas Lampung, para Staff dan Karyawan Jurusan Fisika yang telah membantu dalam administrasi penulis.
6. Orang tua penulis Bapak Heriyanto dan Ibu Marsiah, Kakakku Irena Nadila Fitriana dan Ferri Tanadi, Adikku Anggit Lestari yang selalu memberikan dukungan penuh kepada penulis.

7. Teman Sohib, Rifki Mohammad Kurniawansyah, Razka Wildan, Daffa Abdul Malik, Andrean Johandra, Nur Annisa, Windi, dan Miranti Adelia yang banyak membantu dan tempat tempat cerita penulis.
8. Teman- teman seperjuangan Fisika 2019 dan semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu yang telah memberikan doa, dukungan dan motivasi kepada penulis.

Semoga Allah SWT senantiasa memberikan balasan atas segala kebaikan yang telah dilakukan untuk penulis.

Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakaatuh.

Bandar Lampung, 5 Juni 2026

Muhammmad Asrizal

DAFTAR ISI

Halaman

HALAMAN JUDUL	i
ABSTRAK	ii
ABSTRACT	iii
LEMBAR PENGESAHAN	iv
LEMBAR PERNYATAAN	vi
RIWAYAT HIDUP	vii
MOTTO	viii
PERSEMBAHAN	ix
KATA PENGANTAR	x
SANAWACANA	xi
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR GAMBAR	iv
DAFTAR TABEL	v
I. PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Batasan Masalah	5
1.5 Manfaat Penelitian	5
II. TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Nanopartikel Seng Oksida (ZnO)	6
2.2 Doping AgNO ₃ pada ZnO	9
2.3 <i>Green Synthesis</i> Nanopartikel	12
2.4 Sirih Merah (<i>Piper crocatum</i>)	15

2.5 Mekanisme Antibakteri Nanopartikel ZnO dan ZnO /Ag.....	19
2.6 Karakterisasi Nanopartikel ZnO dan ZnO /Ag	21
2.6.1 X-Ray Diffraction (XRD).....	21
2.6.2 Scanning Electron Microscopy (SEM).....	24
2.7 Penelitian Terkait	27

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian.....	30
3.2 Alat dan Bahan Penelitian	30
3.3 Prosedur Penelitian	30
3.3.1 Pembuatan Ekstrak Daun Sirih Merah.....	31
3.3.2 Sintesis Nanopartikel ZnO.....	32
3.4 Uji Aktivitas Antibakteri Nanopartikel ZnO.....	33
3.4.1 Tahapan Preparasi Media Mueller Hinton Agar	33
3.4.2 Tahapan Preparasi Kultur Bakteri dan Pembuatan Suspensi Bakteri	33
3.4.3 Inokulasi Bakteri pada Media	34
3.4.4 Penempatan Cakram pada Media dan Inkubasi.....	34
3.4.5 Pengamatan dan Pengukuran	34
3.5 Karakterisasi Nanopartikel ZnO	35
3.6 Diagram Alir	35
3.6.1 Diagram Alir Pembuatan Ekstrak Daun Sirih Merah.....	36
3.6.2 Diagram Alir Sintesis Nanopartikel ZnO.....	37
3.6.3 Diagram Alir Uji Aktivitas Antibakteri.....	38

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Sintesis Daun Sirih Merah	39
4.2 Hasil Analisis XRD Nanopartikel ZnO dan ZnO/Ag.....	40
A. Hasil Analisis Kualitatif Nanopartikel ZnO dan ZnO/Ag.....	40
B. Hasil Analisis Kuantitatif Nanopartikel ZnO dan ZnO/Ag.....	48
4.3 Hasil Analisis SEM Nanopartikel ZnO/Ag.....	52
4.4 Hasil Analisis Uji Antibakteri Nanopartikel ZnO dan ZnO/Ag.....	53

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan 56

5.2 Saran..... 57

DAFTAR PUSTAKA..... 58

LAMPIRAN..... 59

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Struktur kristal ZnO	7
Gambar 2.2 Struktur kristal Ag	10
Gambar 2.3 <i>Piper crocatum</i> (daun sirih merah)	17
Gambar 2.4 Mekanisme sintesis nanopartikel ZnO melalui senyawa polifenol (Yuvakkumar <i>et al.</i> , 2014)	18
Gambar 2.5 Skema Hukum Bragg (Cullity, 1978)	22
Gambar 2.6 Diagram XRD	23
Gambar 2.7 Karakterisasi Nano ZnO dengan XRD (Geetha <i>et al.</i> , 2016)	24
Gambar 2.8 Alat SEM	26
Gambar 2.9 Karakterisasi Nano ZnO menggunakan SEM (Geetha <i>et al.</i> , 2016)	27
Gambar 3.1 Diagram alir pembuatan ekstrak daun sirih merah	36
Gambar 3.2 Diagram alir sintesis nanopartikel ZnO	37
Gambar 3.3 Diagram alir uji aktivitas antibakteri	38
Gambar 4.1 Hasil ekstraksi daun sirih merah	39
Gambar 4.2 Sampel hasil sintesis ZnO	40
Gambar 4.3 Difraktogram XRD nanopartikel ZnO dan ZnO/Ag	42
Gambar 4.4 Hasil <i>refinement</i> XRD sampel A (ZnO)	50
Gambar 4.5 Hasil <i>refinement</i> XRD sampel B (ZnO/Ag 10 ml)	50
Gambar 4.6 Hasil Analisis SEM pada sampel ZnO/Ag 30 ml	52
Gambar 4.7 Hasil uji antibakteri nanopartikel ZnO dan ZnO/Ag terhadap bakteri <i>E.coli</i>	53

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 3.1 Variasi AgNO ₃ dan komposisi bahan sintesis nanopartikel ZnO	33
Tabel 4.1 Puncak tertinggi sudut 2θ dan ukuran partikel ZnO	44
Tabel 4.2 Puncak tertinggi sudut 2θ dan ukuran partikel Ag	44
Tabel 4.3 Selisih nilai Δd pada sampel A	45
Tabel 4.4 Selisih nilai Δd pada sampel B	46
Tabel 4.5 Selisih nilai Δd pada sampel C	46
Tabel 4.6 Selisih nilai Δd pada sampel D	47
Tabel 4.7 Parameter <i>refinement</i> data XRD	52
Tabel 4.8 Hasil penguk zona hambat	54

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi di era digital yang saat ini telah membawa dampak yang signifikan terhadap hampir seluruh aspek kehidupan manusia, termasuk bidang sains dan teknologi material. Dalam beberapa dekade terakhir, nanoteknologi telah berkembang sebagai bidang penelitian yang revolusioner karena kemampuannya dalam menghasilkan material berukuran nanometer. Nanoteknologi memberikan peluang besar dalam pengembangan material dengan sifat-sifat unik serta berbagai aplikasi yang luas. Inovasi dalam bidang ini tidak hanya mempercepat proses penelitian dan pengembangan, tetapi juga membuka peluang baru dalam penerapan teknologi canggih untuk menyelesaikan berbagai permasalahan kompleks (Bhusan, 2016). Salah satu inovasi penting dari nanoteknologi adalah pembuatan nanopartikel, yang kini telah diaplikasikan secara luas dalam berbagai bidang seperti kesehatan, pertanian, teknologi informasi, industri, barang konsumsi, energi, pertahanan dan keamanan, serta ekologi dan lingkungan (Jain *et al.*, 2012).

Dewasa ini, seiring dengan kemajuan zaman, resistensi antibiotik telah menjadi salah satu tantangan global yang paling mendesak. Banyak infeksi bakteri kini menjadi semakin sulit diobati karena munculnya strain bakteri yang resisten terhadap antibiotik yang tersedia. Organisasi kesehatan dunia WHO (2022) melaporkan bahwa kemunculan serta penyebaran patogen yang kebal terhadap obat disebabkan oleh kemampuan mereka dalam mengembangkan mekanisme resistensi baru, sehingga memicu terjadinya resistensi antimikroba. Hal yang paling mengkhawatirkan adalah penyebaran cepat bakteri *superbug* secara global, yakni

bakteri yang kebal terhadap berbagai jenis obat karena dapat menyebabkan infeksi yang tidak bisa lagi diatasi dengan antibiotik yang ada. Infeksi akibat bakteri resisten terhadap pengobatan konvensional telah berkontribusi terhadap meningkatnya angka kematian, sehingga mendorong kebutuhan mendesak untuk mengembangkan solusi antibakteri yang lebih efektif dan inovatif.

Perkembangan teknologi nanopartikel telah membawa revolusi besar dalam pencarian agen antimikroba alternatif. Tidak seperti antibiotik biasa, nanopartikel bekerja dengan cara yang lebih beragam dan menyeluruh, sehingga berpotensi mengatasi bakteri yang sudah kebal terhadap antibiotik. Nanopartikel memiliki keunggulan unik berupa rasio luas permukaan terhadap volume yang tinggi, sifat fisikokimia yang dapat dimodifikasi, dan kemampuan untuk menembus pertahanan biologis yang sulit dijangkau oleh molekul konvensional (Siddiqi *et al.*, 2018). Nanopartikel seng oksida, khususnya ZnO telah terbukti memiliki aktivitas antibakteri yang kuat melalui berbagai mekanisme kerja yang meliputi produksi *reactive oxygen species* (ROS), pelepasan ion Zn^{2+} yang bersifat toksik, dan interaksi fisik secara langsung dengan membran sel bakteri (Sirelkhatim *et al.*, 2015). Aktivitas antibakteri nanopartikel ZnO berbanding terbalik dengan ukuran nanopartikel, dimana ukuran nano memungkinkan penetrasi yang lebih baik ke dalam sel bakteri dan meningkatkan kontak dengan target biologis (Raghupathi *et al.*, 2011). Ukuran kecil nanopartikel juga membuatnya lebih mudah masuk dan menembus sel mikroba. Menariknya, ZnO dapat bekerja secara efektif tanpa perlu pencahayaan khusus, sehingga penggunaannya di lingkungan biasa menjadi lebih praktis.

Metode sintesis nanopartikel konvensional yang menggunakan pendekatan fisik dan kimia seringkali melibatkan penggunaan bahan kimia yang berbahaya, kondisi reaksi yang menggunakan suhu tinggi atau tekanan tinggi, dan proses yang kurang ramah dengan lingkungan serta memakan biaya besar. Keterbatasan ini mendorong pengembangan pendekatan sintesis yang lebih ramah lingkungan yaitu dengan pendekatan sintesis hijau (*green synthesis*) yang lebih aman, ekonomis dan ramah lingkungan. Sintesis hijau menggunakan bahan alami, seperti ekstrak tumbuhan, untuk membantu membentuk dan menstabilkan nanopartikel. Proses ini lebih

murah, mudah dilakukan, dan menghasilkan produk yang lebih ramah terhadap tubuh dan lingkungan. Kandungan zat aktif pada ekstrak tanaman seperti flavonoid, alkaloid, terpenoid, dan polifenol yang berperan sebagai *reducing agent* dan *capping agent* secara alami dalam pembentukan nanopartikel, sekaligus memberikan fungsionalitas tambahan pada produk akhir (Mittal *et al.*, 2013). Pendekatan ini tidak hanya mengurangi dampak lingkungan tetapi juga dapat menghasilkan nanopartikel dengan bioaktivitas lebih baik dibandingkan dengan bahan kimia, sehingga menjadikan sintesis hijau sebagai pendekatan yang lebih baik.

Salah satu tanaman yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan sintesis hijau yang ramah lingkungan adalah tanaman sirih merah (*Piper crocatum*). Tanaman sirih merah merupakan tanaman khas Indonesia yang telah lama digunakan secara tradisional untuk mengobati infeksi. Sirih merah terutama bagian daunnya mengandung berbagai jenis zat aktif seperti flavonoid, tanin, alkaloid dan minyak atsiri yang diketahui memiliki sifat antibakteri (Januarti *et al.*, 2019). Zat-zat aktif ini juga dapat digunakan dalam sintesis nanopartikel. Sebagai agen pereduksi, zat-zat aktif ini membantu dalam proses pembentukan nanopartikel, dan sebagai penstabil, senyawa aktif ini membantu dalam mencegah penggumpalan (Dwivedi dan Tripathi, 2014). Selain itu, kandungan seperti antioksidan dalam daun sirih juga tergolong tinggi, sehingga cocok digunakan dalam pembuatan nanopartikel dengan cara yang ramah. Hal menarik lainnya, penggunaan ekstrak daun sirih merah bukan hanya untuk membentuk nanopartikel ZnO, tetapi juga menambah kekuatan antibakteri dari nanopartikel yang dihasilkan, sehingga dari efek yang sinergis ini bisa lebih kuat dalam menghambat bakteri.

Sifat antibakteri dari ZnO dapat ditingkatkan lebih jauh dengan menambahkan doping logam lain, seperti perak (Ag). Perak sendiri telah terbukti secara signifikan perannya dalam membunuh bakteri. Ion perak dikenal memiliki spektrum antimikroba yang sangat luas dengan mekanisme kerja multi-target meliputi kerusakan membran sel melalui interaksi dengan protein membran yang merusak dinding sel, mengganggu proses pernapasan sel, merusak materi genetik, dan memicu stres oksidatif yang menyebabkan kematian sel bakteri (Kim *et al.*, 2007;

Feng *et al.*, 2000). Efek sinergis antara nanopartikel ZnO dan doping Ag diharapkan dapat menghasilkan efek antimikroba yang lebih kuat jika dibandingkan dengan digunakan secara terpisah. Selain itu, doping perak juga menurunkan celah energi (*band gap*) ZnO, sehingga membuatnya lebih aktif di bawah cahaya biasa dan meningkatkan kemampuannya dalam membunuh bakteri (Karunakaran *et al.*, 2015).

Berdasarkan uraian di atas, maka dilakukan penelitian terkait pengaruh doping perak nitrat (AgNO_3) pada nanopartikel seng nitrat (ZnO) yang disintesis menggunakan ekstrak daun sirih merah (*Piper crocatum*) terhadap aktivitas antibakteri. Selain itu, mempelajari terkait pengaruh variasi konsentrasi Ag yaitu 10 ml, 20 ml dan 30 ml terhadap aktivitas antibakteri. Proses yang dilakukan melalui empat tahap yaitu ekstraksi daun sirih merah, sintesis ZnO dan penambahan doping Ag, karakterisasi nanopartikel ZnO dan ZnO/Ag, serta uji aktivitas antibakteri. Pada hasil nanopartikel ZnO dan ZnO/Ag yang didapat setelah proses sintesis, untuk mengetahui karakteristik unsur dan fase dalam penelitian ini menggunakan analisis *X-Ray Diffraction* (XRD) dan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) untuk mengetahui morfologi dari senyawa hasil sintesis.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana karakteristik nanopartikel ZnO dan ZnO/Ag yang disintesis dari ekstrak daun sirih merah menggunakan XRD dan SEM?
2. Bagaimana pengaruh variasi konsentrasi AgNO_3 terhadap uji aktivitas antibakteri nanopartikel ZnO?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui dan menganalisis karakteristik nanopartikel ZnO dan ZnO/Ag yang disintesis dari ekstrak daun sirih merah menggunakan XRD dan SEM.
2. Mengetahui pengaruh variasi konsentrasi doping AgNO_3 pada nanopartikel ZnO

terhadap uji aktivitas antibakteri.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Metode yang digunakan adalah metode *green synthesis* menggunakan ekstrak daun sirih merah.
2. Perbandingan ekstrak daun sirih merah dengan seng nitrat heksahidrat adalah 1:2.
3. Surfaktan yang digunakan adalah NaOH 1M.
4. Campuran larutan ekstrak daun sirih merah dan seng nitrat heksahidrat dipanaskan pada suhu 80 °C.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dalam penelitian ini adalah:

1. Memberikan informasi mengenai pengaruh doping Ag terhadap sifat struktur, ukuran kristalit dan aktivitas antibakteri nanopartikel ZnO dan ZnO/Ag.
2. Memberikan informasi dan sebagai sumber referensi dalam sintesis nanopartikel ZnO dan ZnO/Ag untuk mengembangkan aplikasi dalam bidang kesehatan seperti pembuatan bahan antibakteri.

II. TINJAUAN PUSTAKA

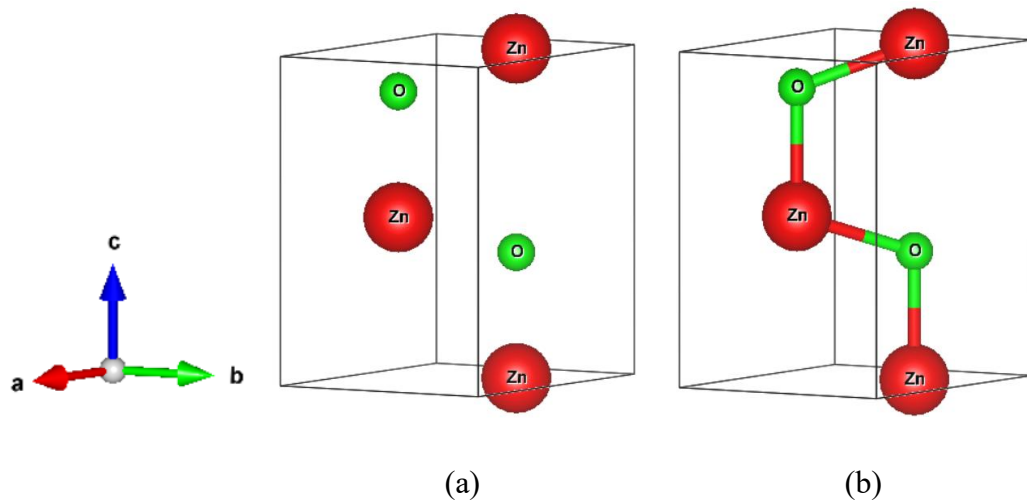
2.1 Nanopartikel Seng Oksida (ZnO)

Seng oksida merupakan senyawa anorganik dengan rumus kimia ZnO, yang secara alami terdapat dalam bentuk mineral *zincite*, namun biasanya dibuat secara sintesis untuk kebutuhan industri. ZnO termasuk dalam golongan semikonduktor tipe-n dan memiliki struktur kristal yang stabil pada suhu dan tekanan normal. Senyawa ini juga bersifat amfoter, artinya dapat bereaksi dengan asam maupun basa (Özgür *et al.*, 2005). Secara kimia ZnO merupakan oksida logam transisi yang memiliki ikatan antara seng (Zn) dan oksigen (O) dengan karakter 60% ionik dan 40% kovalen. Gabungan sifat ini memberikan stabilitas tinggi terhadap panas dan reaksi kimia (Janotti dan van de walle, 2009).

Nanopartikel ZnO merupakan partikel ZnO berukuran nano, yaitu antara 1 hingga 100 nanometer. Dalam skala ini, ZnO memiliki sifat yang berbeda dibandingkan dengan bentuk bulknya, seperti aktivitas fotokatalitik yang lebih tinggi, kemampuan antibakteri, dan respons lebih baik terhadap rangsangan eksternal. Karena ukurannya yang sangat kecil, terjadi fenomena *quantum confinement* yang menyebabkan peningkatan energi celah pita (band gap) dan pergeseran spektrum optik ke arah biru, dimana efek ini tidak terjadi pada ZnO dalam bentuk besar (Brus, 1984).

Berdasarkan struktur kristal, ZnO dapat diklasifikasikan ke dalam tiga bentuk polimorf utama yaitu struktur *wurtzite* (heksagonal), *zinc blende* (kubik), dan *rock salt* (kubik), dengan struktur *wurtzite* merupakan struktur yang paling stabil pada kondisi normal dan banyak ditemukan di alam. Struktur *wurtzite* ZnO memiliki *space group* P63mc dengan parameter kisi $a = b = 3,24940 \text{ \AA}$ dan $c = 5,20380 \text{ \AA}$,

dengan setiap atom Zn dikelilingi oleh empat atom O dalam koordinasi tetrahedral dan sebaliknya, membentuk struktur kristal yang kompak dan stabil. Adapun struktur kristal wurtzite ZnO ditunjukkan pada **Gambar 2.1** yang dibuat menggunakan *software* VESTA.



Gambar 2.1 Struktur kristal ZnO (*wurtzite*): parameter kisi $a = 3,24940 \text{ \AA}$, $b = 3,24940 \text{ \AA}$, dan $c = 5,20380 \text{ \AA}$ (Sawada *et al.*, 1996). (a) tanpa ikatan dan (b) dengan ikatan.

Dari segi morfologi bentuk, nanopartikel diklasifikasikan menjadi beberapa kelompok meliputi *zero-dimensional* (0D) seperti quantum dots dan nanopartikel, *one-dimensional* (1D) seperti nanowires, nanorods, dan nanotube, *two-dimensional* (2D) seperti nanosheets dan nanofilms, serta *three-dimensional* (3D) seperti nanoflowers dan struktur hirarkis (Wang, 2004). Setiap morfologi memiliki karakteristik aplikasi yang spesifik, dimana nanopartikel 0D memberikan luas permukaan maksimal untuk aplikasi katalitik, nanorods 1D menunjukkan konduktivitas listrik yang baik untuk aplikasi elektrik, dan nanosheets 2D memberikan kemampuan gas sensing yang superior (Comini, 2006).

Nanopartikel ZnO menunjukkan sifat fisik yang unik seperti densitas sebesar $5,606 \text{ g/cm}^3$, kekerasan sekitar 4-4,5 pada skala Mohs, titik leleh sekitar $1975 \text{ }^\circ\text{C}$, serta sifat piezoelektrik yang dapat mengubah energi mekanik menjadi listrik (Özgül *et al.*, 2005). Selain itu, ZnO bersifat transparan terhadap cahaya tampak dan mampu menyerap cahaya UV dengan sangat baik, membuatnya ideal untuk pelapis anti-UV

dan bahan bakar konduktor transparan. Dari sisi elektronik, ZnO memiliki *band gap* langsung sebesar 3,37 eV, mobilitas elektron tinggi sekitar 200 cm²/V.s, dan energi pengikat eksiton sebesar 60 meV, yang memungkinkan eksitasi tetap stabil di suhu ruang (Janotti dan Van de Walle, 2009). ZnO bersifat semikonduktor tipe-n karena adanya defek seperti kekosongan oksigen (*oxygen vacancy*) atau kelebihan atom seng (*zinc interstitial*), yang menyumbangkan elektron bebas yang memberikan konduktivitas listrik yang dapat dimodulasi melalui doping. Sifat ferromagnetik nanopartikel ZnO dapat ditingkatkan melalui doping dengan logam transisi seperti Co, Mn, atau Fe, yang dapat membuka peluang dalam aplikasi elektronik (Pearnton *et al.*, 2004).

Dilihat dari segi biologis dan biokompatibilitas, nanopartikel ZnO sangat efektif membunuh berbagai jenis mikroorganisme, baik bakteri gram positif seperti *Staphylococcus aureus*, *Bacillus subtilis*, dan *Streptococcus pyogenes*, serta bakteri gram negatif seperti *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, dan *Salmonella typhimurium* (Sirelkhatim *et al.*, 2015). Nilai konsentrasi minimum untuk menghambat pertumbuhan bakteri (MIC) biasanya berada antara 50-500 µg/ml, tergantung dari ukuran partikel dan metode uji (Siddiqi *et al.*, 2018). ZnO juga efektif melawan jamur seperti *Candida albicans* dan *Aspergillus niger*, melalui kerusakan dinding sel dan gangguan metabolisme. Keunggulan lainnya adalah biokompatibilitas ZnO yang baik terhadap sel manusia. Dalam uji laboratorium, nanopartikel ZnO tidak menyebabkan kerusakan pada sel normal seperti *fibroblas* dan *keratinosit* hingga konsentrasi 100 µg/ml, tetapi tetap mematikan bagi bakteri pada dosis yang sama (Hanley *et al.*, 2008). Hal ini disebabkan karena struktur dinding sel bakteri yang lebih sederhana dan lebih rentan terhadap kerusakan ROS (*Reactive Oxygen Species*) dan ion Zn²⁺ dibandingkan sel manusia (Nel *et al.*, 2006).

Seng oksida dapat membunuh bakteri dengan memanfaatkan efek fotokatalitik yang dimilikinya. Seng oksida (ZnO) bersifat antibakteri dan antijamur dengan cara bekerja merusak dinding bakteri, mengganggu metabolisme sel dan menghambat sintesis sel. Diketahui bahwa semakin besar konsentrasi nanopartikel ZnO yang digunakan, maka akan semakin besar diameter zona hambat yang dihasilkan dalam

menghambat pertumbuhan bakteri (Rhamdiyah dan Maharani, 2022). Aktivitas antibakteri dari ZnO terjadi karena adanya pelepasan ion Zn^{2+} dan spesies oksigen reaktif (ROS) yang menghasilkan radikal hidroksil OH^- dan O_2^{2-} yang merusak DNA dan mendenaturasi protein dari sel. Nanopartikel ZnO kemudian larut dalam media berair dan melepas ion Zn^{2+} . Mekanisme yang terjadi ditunjukkan pada persamaan (1):



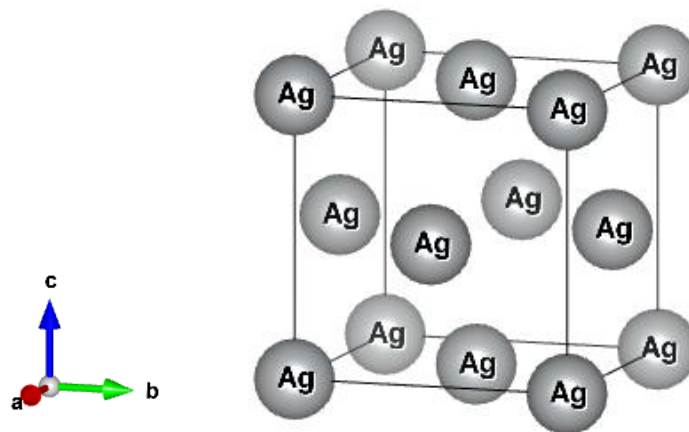
Ion Zn^{2+} akan berikatan dengan muatan negatif pada permukaan membran sel. Interaksi ini akan berakibat terjadinya gangguan pada sel, seperti terhambatnya aktivitas sel bakteri meliputi transpor aktif, metabolisme bakteri dan aktivitas enzim diikuti kebocoran isi sel yang berakibat pada kerusakan dan kematian sel bakteri (Rhamdiyah and Maharani, 2022).

2.2 Doping $AgNO_3$ pada ZnO

Doping merupakan proses memasukkan ion atau atom asing ke dalam struktur kristal suatu material untuk memodifikasi sifat elektronik, optik atau fungsional lainnya (Wan *et al.*, 2008). Pada nanopartikel ZnO doping dapat terjadi melalui tiga mekanisme utama, yaitu penggantian ion Zn^{2+} oleh dopan (substitusi kation), penggantian ion O^{2-} (substitusi anion), atau dopan menempati posisi di antara kisi krista (interstisial). Karena ukuran partikel yang sangat kecil, efek permukaan dan ukuran kuantum sangat mempengaruhi distribusi dopan dan karakteristik yang dihasilkan (Norris *et al.*, 2008). Distribusi dopan tergantung pada kondisi sintesis, ukuran relatif dopan terhadap ion asli, dan energi yang dibutuhkan untuk membentuk defek dalam kristal. Konsentrasi doping yang umum digunakan berada pada kisaran 1-10% molar. Jika terlalu rendah, efek doping tidak signifikan, dan jika terlalu tinggi, bisa terjadi pemisahan fase dan menurunnya kualitas kristal (Sharma *et al.*, 2012).

Perak (Ag) merupakan logam mulia dengan sifat antimikroba yang sangat kuat, bahkan pada konsentrasi yang sangat rendah. Radius ion Ag^+ (1,15 Å) lebih besar jika dibandingkan dengan Zn^{2+} (0,74 Å), sehingga tidak mudah menggantikan Zn^{2+}

dalam struktur kristal ZnO, tetapi dapat terjadi pada konsentrasi rendah dengan menyebabkan sedikit tegangan pada kisi kristal (Shanon, 1976). Perak memiliki konduktivitas yang tinggi dan dapat menghasilkan resonansi plasmon permukaan, yang bermanfaat untuk aplikasi optik. AgNO_3 , sebagai sumber ion Ag^+ , sangat larut dalam air dan mudah mengalami reduksi menjadi Ag^0 (Dean, 1999). Dalam sintesis ZnO/Ag, ion Ag^+ dari AgNO_3 dapat mengalami reduksi menjadi nanopartikel perak metali (Ag^0) melalui interaksi dengan agen pereduksi seperti senyawa organik yang terdapat dalam ekstrak tanaman, atau tetap dalam bentuk ionik dan berinteraksi dengan permukaan ZnO melalui adsorpsi atau substitusi parsial (Zhang *et al.*, 2008). Struktur kristal Ag ditunjukkan pada **Gambar 2.2** yang dibuat menggunakan *software* VESTA.

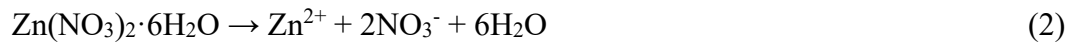


Gambar 2.2 Struktur kristal Ag: parameter kisi $a = b = c = 4,086 \text{ \AA}$ (Norby *et al.*, 2002)

Mekanisme doping AgNO_3 pada nanopartikel ZnO melibatkan serangkaian reaksi kompleks yang bergantung pada metode sintesis, kondisi reaksi, dan konsentrasi prekursor yang digunakan (Lu *et al.*, 2012). Pada sintesis dengan pendekatan sintesis hijau yang menggunakan ekstrak tanaman, proses doping terjadi secara simultan dengan pembentukan nanopartikel ZnO, dimana senyawa pereduksi alami dalam ekstrak tanaman mereduksi dengan baik ion Zn^{2+} maupun Ag^+ dalam medium reaksi yang sama. Tahap awal melibatkan kompleksasi ion logam dengan biomolekul seperti polifenol, flavonoid, diikuti reduksi parsial dan nukleasi yang menghasilkan nanopartikel utama ZnO dengan perak terdistribusi pada permukaan atau dalam struktur kristal (Kavitha *et al.*, 2013). Reaksi kimia yang terlibat dalam

proses doping AgNO₃ pada ZnO melalui sintesis hijau dapat direpresentasikan dalam beberapa tahap reaksi berikut.

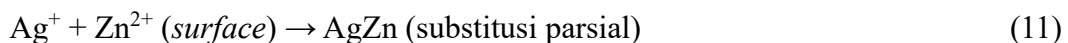
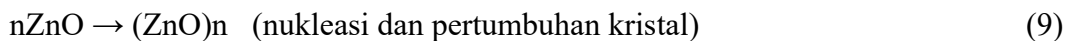
Tahap 1: Hidrolisis dan Kompleksasi



Tahap 2: Reduksi dan Nukleasi



Tahap 3: Pertumbuhan dan Doping



Struktur nanopartikel ZnO/Ag dapat diklasifikasikan kedalam beberapa kategori berdasarkan distribusi dan morfologi komponen perak dalam matriks ZnO. Beberapa diantaranya yaitu *core-shell structure* yaitu konfigurasi dengan nanopartikel ZnO membentuk inti yang dikelilingi oleh perak atau sebaliknya, memberikan kontrol yang baik terhadap sifat interfacial dan transfer muatan antara kedua komponen. *Yolk-shell structure* menunjukkan konfigurasi dimana nanopartikel perak berada dalam rongga yang dikelilingi oleh ZnO, memberikan stabilitas tinggi terhadap agregasi dan sintering pada temperatur tinggi (Hu *et al.*, 2007). *Janus particles* merupakan struktur dengan dua sisi yang berbeda, serta *nanocomposite structure* yang menunjukkan distribusi acak nanopartikel perak

dalam matriks ZnO atau sebaliknya, dimana kedua komponen mempertahankan identitas kristalografi masing-masing namun berinteraksi melalui permukaan yang luas (Kamat, 2002).

Morfologi dipengaruhi oleh rasio bahan, energi permukaan, dan kecepatan pertumbuhan kristal. Penggunaan surfaktan dan agen penstabil dapat membantu mengontrol bentuk dan ukuran partikel (Peng *et al.*, 1998). Konsentrasi doping AgNO₃ dapat mempengaruhi struktur kristal, sifat optik, dan aktivitas fungsional ZnO, dimana terdapat konsentrasi optimal untuk memberikan kemampuan maksimal untuk aplikasi spesifik.

2.3 Green Synthesis Nanopartikel

Sintesis nanopartikel, khususnya ZnO dapat dilakukan menggunakan berbagai macam metode. Secara fundamental, sintesis nanopartikel dapat diklasifikasikan menjadi dua pendekatan berdasarkan arah proses pembentukannya, yaitu pendekatan *top-down* dan *bottom-up*. Pendekatan *top-down* merupakan proses sintesis nanomaterial dengan cara membuat struktur yang lebih kecil dari sebuah material yang berukuran besar atau secara singkat mengubah ukuran dari sebuah material yang besar menjadi ukuran kecil. Pendekatan *top-down* dapat dilakukan melalui metode seperti *ball milling*, *erosion*, *mechanical grinding* dan sonikasi. Sementara itu, kebalikan dari metode *top-down* yaitu *bottom-up* merupakan proses sintesis nanopartikel yang menghasilkan sebuah struktur dengan cara menggabungkan atom-atom atau molekul-molekul penyusunnya. Teknik *bottom-up* sendiri dapat dilakukan melalui metode evaporasi, *sputtering*, *sol gel*, *Chemical Vapor Deposition* (CVD), *Metal Organic Chemical Vapor Deposition* (MOCVD), *aerosol*, *chemical precipitation*, dan *Gas Phase Agglomeration* (Masta, 2020).

Metode konvensional untuk sintesis ZnO umumnya melibatkan pendekatan kimia dan fisika yang memerlukan kondisi yang kurang bagus seperti suhu tinggi, tekanan tinggi, atau penggunaan bahan kimia yang berbahaya. Metode kimia konvensional seperti *sol gel*, presipitasi, dan hidrotermal sering menggunakan pelarut organik berbahaya dan surfaktan sintesis yang dapat menimbulkan dampak negatif terhadap

lingkungan. Sementara itu, metode fisika seperti *vapor-phase transport*, *thermal evaporation*, dan *pulsed laser deposition* memerlukan konsumsi energi yang tinggi dan peralatan yang mahal. Keterbatasan dari metode konvensional tersebut mendorong pengembangan pendekatan yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan, salah satunya adalah metode *green synthesis*.

Metode *green synthesis* menawarkan berbagai keunggulan yang lebih signifikan dibandingkan dengan metode konvensional. Keunggulan utama adalah aspek ramah lingkungan karena tidak menggunakan bahan kimia beracun atau pelarut organik berbahaya, sehingga mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan dan kesehatan manusia. Selain itu, metode ini juga lebih ekonomis karena memanfaatkan bahan baku yang murah dan mudah diperoleh, serta tidak memerlukan peralatan yang mahal atau kondisi reaksi yang ekstrem. Dari segi energi, *green synthesis* berlangsung pada suhu kamar atau suhu yang relatif rendah, sehingga menghemat konsumsi energi secara signifikan. Nanopartikel yang dihasilkan umumnya memiliki biokompatibilitas yang lebih baik karena adanya lapisan biomolekul alami di permukaannya, yang membuatnya cocok untuk aplikasi biomedis (Jiang *et al.*, 2018). Selain itu, proses sintesis yang sederhana dan dapat dilakukan dalam kondisi ambient membuat metode ini mudah untuk diterapkan dalam skala laboratorium maupun industri.

Green synthesis atau biosintesis merupakan pendekatan inovatif dalam pembuatan nanopartikel yang memanfaatkan organisme hidup atau biomolekul alami sebagai agen pereduksi dan penstabil. Metode ini dikembangkan sebagai alternatif yang lebih ramah lingkungan, ekonomis, dan berkelanjutan dibanding metode konvensional. *Green synthesis* menggunakan prinsip kimia hijau yang meminimalkan atau menghilangkan penggunaan dan produksi zat berbahaya, serta memanfaatkan sumber daya terbarukan (Anastas dan Warner, 2000). Konsep *green synthesis* pertama kali diperkenalkan sebagai respons terhadap kebutuhan akan metode sintesis yang berkelanjutan dan ramah lingkungan. Pendekatan ini memanfaatkan berbagai sumber biologis seperti ekstrak tumbuhan, mikroorganisme, enzim dan biomolekul lainnya yang berfungsi sebagai agen pereduksi sekaligus penstabil dalam pembentukan nanopartikel (Vijayaraghavan

dan Ashokkumar, 2017). Keunggulan utama metode ini terletak pada kemampuannya menghasilkan nanopartikel dengan morfologi yang terkontrol tanpa memerlukan kondisi sintesis yang berbahaya.

Sintesis nanopartikel melalui tanaman dapat dilakukan menggunakan bagian-bagian tumbuhan salah satunya daun. Penggunaan daun tanaman untuk sintesis biasanya dibuat ke dalam bentuk ekstrak daun. Berbagai jenis tanaman telah digunakan sebagai sumber ekstrak biologis, contohnya daun *Azadirachta indica*, *Aloe Vera*, *Camellia sinensis*, dan *Moringa oleifera* (Elumalai dan Velmugran, 2015). Diketahui bahwa ekstrak daun banyak mengandung berbagai senyawa bioaktif seperti flavonoid, alkaloid, terpenoid, dan senyawa fenolik yang berperan sebagai agen pereduksi dan penstabil dalam proses sintesis. Dalam prosesnya, sintesis ZnO menggunakan ekstrak daun umumnya melibatkan pencampuran ekstrak daun dengan surfaktan garam seng seperti seng nitrat atau seng asetat, pada kondisi suhu kamar atau suhu yang sedikit meningkat. Reaksinya berlangsung dalam waktu yang bervariasi, mulai dari beberapa menit hingga beberapa jam, bergantung pada jenis ekstrak dan kondisi reaksi (Jamdagni *et al.*, 2018). Pembentukan nanopartikel ZnO dapat dilihat dari perubahan warna larutan dari bening menjadi keruh atau putih susu, yang mengindikasikan nukleasi dan pertumbuhan partikel.

Mekanisme sintesis nanopartikel, khususnya ZnO melalui *green synthesis* melibatkan serangkaian reaksi kompleks antara ion zink dan senyawa bioaktif dalam ekstrak daun tanaman. Proses ini dimulai dengan tahap nukleasi, dimana ion Zn^{2+} dari garam prekursor berinteraksi dengan senyawa pereduksi dalam ekstrak daun untuk membentuk inti kristal ZnO (Rajiv *et al.*, 2013). Senyawa fenolik seperti flavonoid dan tanin berperan sebagai agen pereduksi utama melalui donasi elektron pada ion logam. Fitokimia dalam ekstrak tanaman memiliki peran yang multifungsi dalam proses sintesis. Senyawa seperti quercetin, kaempferol, dan asam galat tidak hanya berfungsi sebagai agen pereduksi tetapi juga sebagai agen penstabil yang mencegah aglomerasi partikel melalui pembentukan lapisan pelindung di permukaan nanopartikel (Dobrucka, 2018). Protein dan asam amino juga berkontribusi dalam proses stabilisasi melalui interaksi elektrostatis dan

pembentukan ikatan hidrogen dengan permukaan nanopartikel. Mekanisme molekuler yang terjadi melibatkan transfer elektron dari gugus hidroksil (-OH) gugus karbonil (C=O) dalam senyawa organik kepada ion Zn^{2+} , yang kemudian tereduksi dan mengalami hidrolisis untuk membentuk ZnO. Proses ini dipengaruhi oleh pH larutan, dimana kondisi basa mendukung pembentukan hidroksida zink yang selanjutnya terdekomposisi menjadi ZnO melalui pelepasan molekul air (Sangeetha *et al.*, 2011).

Keberhasilan sintesis nanopartikel ZnO melalui metode *green synthesis* dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor yang saling berinteraksi. Pengaruh seperti konsentrasi ekstrak, pH larutan, suhu reaksi, kualitas dan sumber ekstrak tanaman serta waktu reaksi sangat mempengaruhi hasil sintesis nanopartikel ZnO. Konsentrasi ekstrak tanaman dapat berpengaruh pada ukuran dan morfologi nanopartikel yang dihasilkan. Konsentrasi yang terlalu rendah dapat menghasilkan partikel dengan ukuran yang tidak seragam, sedangkan konsentrasi yang terlalu tinggi dapat menyebabkan aglomerasi (Kalpana *et al.*, 2018). pH larutan dapat mempengaruhi kinetika reaksi dan stabilitas nanopartikel. Kondisi pH yang optimal untuk sintesis ZnO umumnya berada pada rentang 8-12, dimana pada pH tersebut terjadi kesetimbangan antara proses nukleasi dan pertumbuhan kristal. Suhu reaksi berperan dalam mengontrol laju reaksi dan morfologi produk, dengan suhu yang lebih tinggi umumnya menghasilkan partikel yang lebih kecil namun dengan distribusi ukuran yang lebih luas. Waktu reaksi mempengaruhi tingkat konversi prekursor menjadi nanopartikel serta stabilitas produk akhir. Waktu yang relatif singkat dapat menghasilkan konversi yang tidak sempurna, sedangkan waktu yang terlalu lama dapat menyebabkan pertumbuhan berlebihan dan aglomerasi partikel (Martinise *et al.*, 2017). Kualitas dan sumber ekstrak tumbuhan dapat mempengaruhi reproduktibilitas sintesis, mengingat kandungan fitokimia dapat bervariasi tergantung pada faktor lingkungan, musim dan metode ekstraksi.

2.4 Sirih Merah (*Piper crocatum*)

Sirih merah (*Piper crocatum*) merupakan spesies dari keluarga Piperaceae yang secara taksonomi diklasifikasikan ke dalam Kingdom Plantae, Divisi Magnoliophyta, Kelas Magnoliopsida, Ordo Piperales, Famili Piperaceae, dan

Genus Piper. Genus Piper memiliki lebih dari 1000 spesies yang tersebar di seluruh dunia, dengan berbagai varietas seperti sirih merah, sirih hijau, sirih kuning dan sirih hitam. Tanaman sirih merah dikenal dengan berbagai nama lokal seperti red betel, sirih merah (Indonesia), dan red piper (Inggris). Persebaran alami sirih merah meliputi wilayah Asia Tenggara, khususnya Indonesia, Malaysia, Thailand, dan Filipina. Di Indonesia, sirih merah dapat ditemukan secara alami di berbagai pulau termasuk Sumatera, Jawa, Kalimantan, dan Sulawesi. Tanaman ini tumbuh optimal di daerah tropis dengan kelembaban tinggi dan suhu berkisar 25-50°C. Saat ini, kultivasi sirih merah telah menyebar ke berbagai negara tropis seperti India, Sri Lanka, dan beberapa negara Amerika Selatan sebagai tanaman hias dan obat tradisional (Li *et al.*, 2019). Kemampuan adaptasi yang baik terhadap berbagai kondisi iklim tropis membuat sirih merah menjadi bahan baku yang potensial untuk aplikasi nanoteknologi hijau.

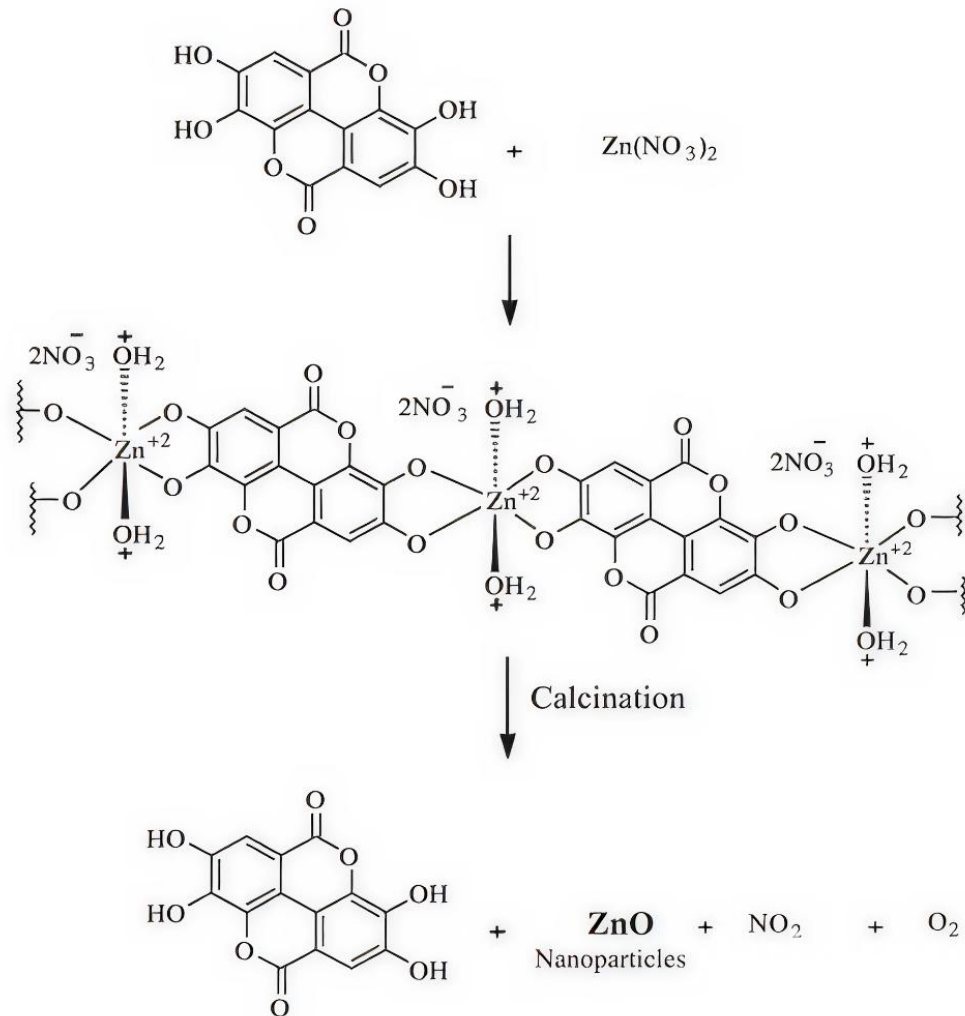
Secara morfologi, sirih merah memiliki daun yang berbentuk jantung dengan warna merah keunguan yang khas dengan panjang sekitar 8-16 cm dan lebar 5-10 cm, batang merambat, dan bunga berbentuk bulir (Chaveerach *et al.*, 2006). Permukaan daun bagian atas menunjukkan warna hijau tua hingga kemerahan dengan corak atau bercak merah yang khas, sedangkan permukaan bawah cenderung lebih pucat dengan warna merah muda hingga ungu muda. Tekstur daun agak tebal dan keras dengan permukaan yang sedikit kasar dan mengkilap (Saleh *et al.*, 2019). Sistem pertulangan daun sirih merah tergolong palminervis dengan 5-7 tulang daun utama yang menyebar dari pangkal daun. Tulang daun primer berwarna merah hingga ungu tua yang kontras dengan warna hijau daun menciptakan pola yang dekoratif. **Gambar 2.3** menunjukkan daun sirih merah.



Gambar 2.3 *Piper crocatum* (Tampak depan dan tampak belakang).

Tanaman sirih merah merupakan tanaman tropis yang telah lama dikenal memiliki kandungan senyawa bioaktif yang tinggi dan potensi aplikasi dalam berbagai bidang termasuk nanoteknologi. Tanaman ini mengandung berbagai senyawa fitokimia seperti flavonoid, alkaloid, saponin, tanin dan senyawa fenolik lainnya yang berperan penting dalam proses *green synthesis* nanopartikel (Siswina *et al.*, 2023). Kandungan senyawa bioaktif yang kaya dalam daun sirih merah menjadikannya kandidat yang menarik sebagai agen bioreduktor dalam sintesis nanopartikel. Penggunaan ekstrak daun sirih merah dalam sintesis nanopartikel telah menunjukkan hasil yang menjanjikan dalam beberapa penelitian. Ekstrak daun sirih merah mengandung senyawa aktif seperti eugenol, chavicol, dan hydroxychavicol yang memiliki kemampuan sebagai agen pereduksi alami. Selain itu, kandungan polifenol dan flavonoid yang tinggi dalam daun sirih merah berperan sebagai agen penstabil yang dapat mencegah aglomerasi nanopartikel dan mengontrol pertumbuhan kristal.

Yuvakkumar *et al.*, (2014) melaporkan bahwa sintesis nanopartikel ZnO dapat dilakukan melalui senyawa polifenol. Senyawa polifenol dapat membentuk senyawa kompleks dengan kation logam melalui gugus hidroksilnya yang berkaitan dengan ion Zn^{2+} . Kompleks ini kemudian dapat mengalami dekomposisi ketika dipanaskan dan membentuk nanopartikel seng oksida. Mekanisme sintesis nanopartikel ZnO melalui senyawa polifenol dapat dilihat pada **Gambar 2.4**.



Gambar 2.4 Mekanisme sintesis nanopartikel ZnO melalui senyawa polifenol (Yuvakkumar *et al.*, 2014).

Sintesis nanopartikel ZnO menggunakan ekstrak daun sirih merah melibatkan interaksi kompleks antara ion Zn^{2+} dari prekursor dengan senyawa bioaktif dalam ekstrak. Senyawa fenolik seperti eugenol dan hydroxychavicol bertindak sebagai agen pereduksi melalui donasi elektron pada ion logam, membentuk inti kristal ZnO yang stabil. Senyawa flavonoid seperti quercetin dan kaempferol yang terdapat dalam sirih merah juga berkontribusi dalam proses reduksi melalui gugus hidroksil aktif (Bhuyan *et al.*, 2015). Alkaloid yang terkandung dalam daun sirih merah berperan sebagai agen penstabil dengan membentuk kompleks dengan permukaan nanopartikel ZnO, mencegah aglomerasi dan mengontrol ukuran partikel. Saponin dan tanin juga berkontribusi dalam stabilisasi nanopartikel melalui pembentukan

lapisan pelindung di permukaan partikel yang memberikan stabilitas sterik dan elektrostatik (Dobrucka, 2018).

Senyawa aktif yang terdapat dalam tanaman sirih merah, selain berfungsi sebagai agen pereduksi dan penstabilisasi juga diketahui memiliki banyak potensi untuk mengobati berbagai penyakit, diantaranya berpotensi sebagai antioksidan, antihiperglikemia, antikanker dengan meningkatkan proliferasi sel kanker dan juga sebagai antidiabetes serta minyak atsiri yang berpotensi sebagai antifungi dan bakterisida (Puspita *et al.*, 2018). Hal ini dapat membuka peluang yang lebih luas dalam pemanfaatan daun sirih merah terutama di bidang industri kesehatan dan nanoteknologi. Efek sinergis dapat terjadi apabila sintesis nanopartikel ZnO disintesis menggunakan ekstrak daun sirih merah untuk aplikasi antibakteri dan antimikroba. Sehingga menambah kemampuan produk yang dihasilkan dalam perannya sebagai antibakteri dan antimikroba.

Beberapa penelitian terkait uji aktivitas antibakteri sirih merah terhadap bakteri *Escherichia coli* (Gunarti dan Utari, 2018) dan *Streptococcus mutans* (Ningsih *et al.*, 2013) telah berhasil dilakukan. Pada penelitian yang dilakukan Gunarti dan Utari (2018), didapatkan bahwa fraksi heksana, etil asetat, dan etanol daun sirih merah memiliki daya antibakteri terhadap bakteri *Escherichia coli* dengan diameter zona hambat sebesar 8 mm, 9 mm dan 7mm. Ningsih *et al* (2013) dalam penelitiannya menggunakan daun sirih merah sebagai daya hambat terhadap *Streptococcus mutans* telah diuji dan menunjukkan hasil yang baik. Diketahui bahwa ekstrak daun sirih merah dengan konsentrasi 100% memiliki keefektifan yang sama dengan *Chlorhexidine* (sebagai kontrol positif). Konsentrasi minimal pada ekstrak daun sirih merah untuk menghambat *Streptococcus mutans* adalah 1%.

2.5 Mekanisme Antibakteri Nanopartikel ZnO dan ZnO/Ag

Nanopartikel seng oksida (ZnO) diketahui memiliki aktivitas antibakteri yang kuat terhadap berbagai jenis bakteri Gram positif maupun Gram negatif. Mekanisme utamanya melibatkan beberapa proses, yaitu pembentukan *reactive oxygen species*

(ROS), pelepasan ion Zn^{2+} , serta interaksi fisik dengan dinding sel bakteri (Sirelkhatim *et al.*, 2015).

Dalam kondisi penyinaran atau eksitasi energi, ZnO menghasilkan pasangan elektron-hole (e^-/h^+) yang bereaksi dengan oksigen dan air di sekitarnya membentuk radikal bebas seperti $\bullet OH$, O_2^- , dan H_2O_2 . Spesies reaktif ini mampu merusak membran sel, protein, serta DNA bakteri, sehingga menghambat pertumbuhan atau menyebabkan kematian sel (Raghupathi *et al.*, 2011).

Selain itu, ZnO juga dapat melepaskan ion Zn^{2+} ke dalam medium, yang bersifat toksik terhadap mikroorganisme. Ion Zn^{2+} dapat menembus membran bakteri dan mengganggu aktivitas enzim serta stabilitas DNA (Pasquet *et al.*, 2014). Mekanisme lain yang mendukung adalah interaksi elektrostatis antara permukaan nanopartikel bermuatan positif dengan membran bakteri bermuatan negatif, yang dapat menyebabkan kerusakan fisik pada dinding sel dan kebocoran isi sitoplasma (Azam *et al.*, 2012).

Efektivitas antibakteri ZnO juga dipengaruhi oleh ukuran dan morfologi partikel. Semakin kecil ukuran partikel, semakin besar luas permukaan spesifik, yang memungkinkan kontak lebih efektif antara ZnO dan bakteri (Abdelmijid *et al.*, 2022). Doping atau penambahan perak (Ag) pada ZnO terbukti meningkatkan aktivitas antibakteri melalui efek sinergis antara kedua logam tersebut (Ghosh *et al.*, 2012). Ion Ag^+ yang dilepaskan dari nanopartikel ZnO–Ag mampu berikatan dengan gugus thiol (-SH) pada protein sel bakteri, mengganggu aktivitas enzimatik serta merusak DNA (Jung *et al.*, 2008).

Selain itu, Ag dapat bertindak sebagai *electron trap* yang menangkap elektron bebas dari ZnO, sehingga menurunkan laju rekombinasi pasangan e^-/h^+ dan meningkatkan produksi ROS (Ghosh *et al.*, 2012). Dengan demikian, jumlah spesies oksigen reaktif yang terbentuk meningkat, memperkuat mekanisme oksidatif yang merusak membran dan komponen sel bakteri.

Fase Ag yang terdispersi pada permukaan ZnO juga dapat mempercepat pelepasan ion Ag^+ serta memberikan aksi kontak langsung terhadap membran bakteri (Sirelkhatim *et al.*, 2015). Kombinasi antara pelepasan ion logam (Zn^{2+} dan Ag^+),

peningkatan pembentukan ROS, serta interaksi langsung dengan dinding sel menghasilkan aktivitas antibakteri ZnO–Ag yang lebih tinggi dibandingkan ZnO murni.

Aktivitas antibakteri nanopartikel ZnO doping Ag menunjukkan spektrum yang luas dan efektivitas yang tinggi terhadap berbagai patogen bakteri. Studi menunjukkan bahwa nanopartikel ZnO/Ag efektif terhadap bakteri Gram-positif seperti *Staphylococcus aureus* dan *Streptococcus*, maupun bakteri Gram-negatif seperti *Escherichia coli* dan *Pseudomonas aeruginosa* (Kumar *et al.*, 2022). Keunggulan yang sangat signifikan adalah kemampuan nanopartikel ini untuk mengatasi bakteri yang resisten terhadap antibiotik konvensional, yang merupakan tantangan utama dalam pengobatan infeksi modern. Mekanisme multi yang dimiliki nanopartikel ZnO membuat bakteri sulit untuk mengembangkan resistensi karena harus menghadapi beberapa kondisi stres secara bersamaan.

2.6 Karakterisasi Nanopartikel ZnO dan ZnO/Ag

2.6.1 X-Ray Diffraction (XRD)

X-Ray Diffraction (XRD) merupakan salah satu metode karakterisasi material yang digunakan untuk menentukan struktur kristal, jenis fasa, dan ukuran kristalit pada suatu bahan padatan. Prinsip kerja teknik ini didasarkan pada difraksi sinar-X yang terjadi ketika sinar-X dengan panjang gelombang tertentu diarahkan pada bidang-bidang atom dalam suatu kristal, menghasilkan pola interferensi khas yang dapat dianalisis secara kuantitatif (Cullity, 1978).

Sinar-X sendiri merupakan gelombang elektromagnetik dengan panjang gelombang berkisar antara 0,01 hingga 10 nm, yang jauh lebih pendek dibandingkan panjang gelombang cahaya tampak (400–800 nm) (Smallman, 2000). Panjang gelombang sinar-X ini sebanding dengan jarak antar bidang atom (interplanar spacing) pada kristal, sehingga sangat sesuai untuk menyelidiki struktur atomik material padat.

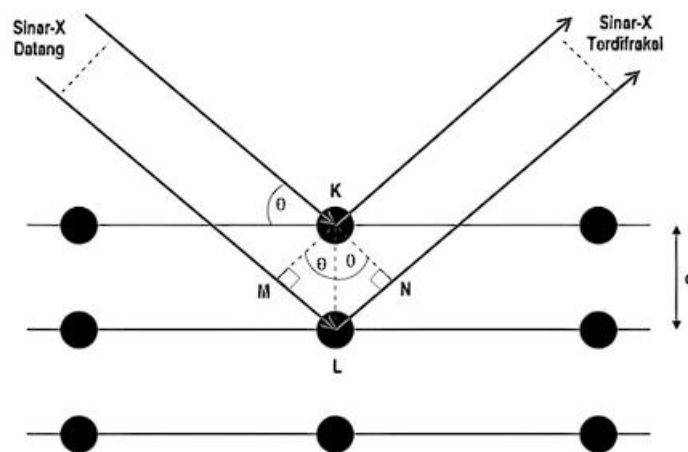
Dalam sistem XRD, berkas sinar-X dihasilkan oleh tabung sinar-X dan difokuskan menuju permukaan sampel. Sebagian berkas akan dipantulkan (difraksi) oleh bidang kristal, sementara sebagian lainnya diteruskan ke detektor. Detektor

berfungsi mengubah foton sinar-X menjadi sinyal listrik yang kemudian diterjemahkan menjadi data intensitas dan posisi sudut difraksi (2θ). Berkas yang sefase akan mengalami interferensi konstruktif dan menghasilkan puncak difraksi yang teramati pada pola XRD, sedangkan berkas yang tidak sefase akan saling melemahkan (Cullity, 1978).

Fenomena difraksi sinar-X dijelaskan melalui Hukum Bragg, yang menyatakan bahwa interferensi konstruktif terjadi ketika perbedaan lintasan antar berkas sinar-X yang dipantulkan dari bidang kristal memenuhi persamaan:

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (12)$$

dengan n adalah orde difraksi (bilangan bulat positif), λ panjang gelombang sinar-X, d jarak antar bidang kristal, dan θ sudut difraksi. Persamaan ini merupakan dasar untuk menentukan parameter kisi dan struktur kristal dari suatu material (Cullity, 1978). Skema fenomena difraksi berdasarkan Hukum Bragg ditunjukkan pada **Gambar 2.5**.



Gambar 2.5 Skema Hukum Bragg (Cullity, 1978). Keterangan d = jarak antar bidang kristal dan θ = sudut difraksi

Pola difraksi sinar-X setiap bahan memiliki ciri khas tersendiri, karena bergantung pada struktur kristal, komposisi atom, dan orientasi kisi kristalnya. Oleh karena itu, data hasil XRD dapat digunakan untuk mengidentifikasi fasa kristalin dengan

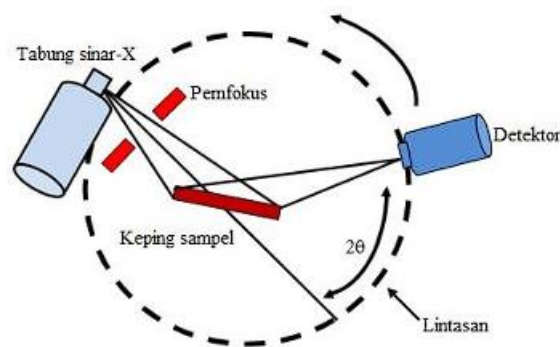
membandingkan posisi puncak (2θ) terhadap data referensi yang terdapat dalam database seperti *International Centre for Diffraction Data* (ICDD) atau *Crystallography Open Database* (COD).

Selain menentukan jenis fasa, XRD juga dapat digunakan untuk menghitung ukuran kristalit (*crystallite size*) melalui persamaan Scherrer, yaitu:

$$L = \frac{0,9\lambda}{B \cos \theta} \quad (13)$$

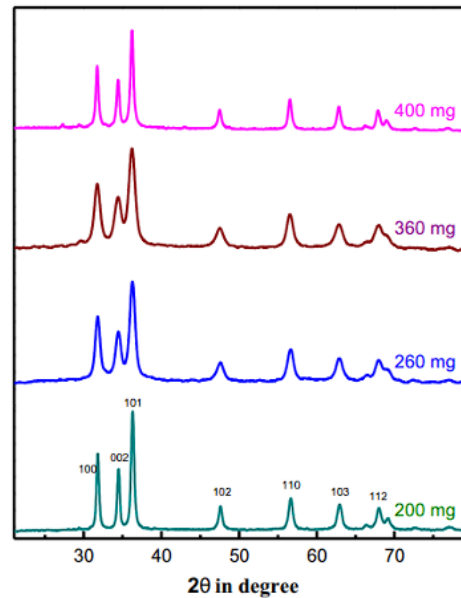
di mana L adalah ukuran kristalit, λ panjang gelombang sinar-X, B adalah lebar puncak difraksi pada *Full Width at Half Maximum* (FWHM), dan θ merupakan sudut difraksi. Persamaan ini digunakan untuk memperkirakan ukuran partikel kristal dari data XRD, dengan satuan B dinyatakan dalam radian.

Dalam praktiknya, sistem XRD terdiri dari tiga komponen utama, yaitu sumber sinar-X, sampel, dan detektor. Sumber sinar-X dapat berupa tabung sinar-X dengan target logam tertentu seperti Cu atau Co, yang memancarkan sinar-X karakteristik. Sinar ini diarahkan ke sampel, dan berkas yang terdifraksi akan diterima oleh detektor yang kemudian menerjemahkan sinyalnya menjadi pola difraksi (Smallman dan Bishop, 1999). Diagram bagian-bagian utama sistem XRD ditunjukkan pada **Gambar 2.6**.



Gambar 2.6 Diagram XRD (Smallman dan Bishop, 1999).

Geetha *et al* (2016) melaporkan mengenai sintesis nanaopartikel menggunakan getah tanaman *Euphorbia jatropha* sebagai agen pereduksi. Nanopartikel yang dihasilkan kemudian dikarakterisasi menggunakan XRD, dengan hasil karakterisasi ditampilkan pada **Gambar 2.7**



Gambar 2.7 Karakterisasi Nano ZnO dengan XRD (Geetha *et al.*, 2016)

Gambar 2.7 karakterisasi dilakukan pada variasi ekstrak tanaman sebesar 400 mg, 360 mg, 260 mg dan 200 mg, menggunakan panjang gelombang sinar-X sebesar 1,5405 Å. Berdasarkan pola difraksi pada gambar tersebut, puncak-puncak yang teramati sesuai dengan puncak karakterisasi ZnO, yang menunjukkan bahwa nanopartikel ZnO berhasil disintesis.

2.6.2 Scanning Electron Microscopy (SEM)

Scanning Electron Microscopy (SEM) atau Mikroskop Elektron Pemindai merupakan salah satu jenis mikroskop elektron yang menggunakan berkas elektron untuk menghasilkan gambaran morfologi permukaan sampel dengan resolusi tinggi. SEM mampu menghasilkan pembesaran hingga 300.000 kali dengan kedalaman fokus yang sangat baik, sehingga menghasilkan gambaran tiga dimensi yang karakteristik (Goldstein *et al.*, 1992).

Instrumen ini pertama kali dikembangkan pada tahun 1960-an dan telah menjadi alat yang sangat penting dalam berbagai bidang penelitian, termasuk ilmu material, biologi, geologi, dan metalurgi. Keunggulan utama SEM dibandingkan dengan mikroskop optik adalah kemampuannya untuk menghasilkan resolusi yang jauh lebih tinggi dan kedalaman fokus yang lebih besar (Goodhew dan Humphreys, 1988). Berbeda dengan mikroskop optik yang menggunakan cahaya, SEM menggunakan berkas elektron yang difokuskan untuk memindai permukaan spesimen. Interaksi antara elektron dengan atom-atom pada permukaan spesimen menghasilkan berbagai sinyal yang dapat dideteksi dan digunakan untuk membentuk gambaran permukaan sampel (Sawyer dan Grubb, 1987).

Prinsip kerja SEM didasarkan pada interaksi antara berkas elektron berenergi tinggi dengan permukaan sampel. Berkas elektron dihasilkan oleh sumber elektron (*electron gun*) melalui emisi termionik dari filamen tungsten atau kristal lantanum heksaborida (LaB_6) yang dipanaskan. Elektron-elektron ini kemudian dipercepat oleh medan listrik dengan tegangan tinggi, biasanya berkisar antara 1-30 kV (Reimer, 1998).

Berkas elektron yang dihasilkan selanjutnya difokuskan oleh sistem lensa elektromagnetik yang terdiri dari lensa kondensor dan lensa objektif. Lensa-lensa ini berfungsi untuk menghasilkan berkas elektron yang sangat halus dengan diameter sekitar 5-10 nanometer pada permukaan sampel (Goodhew dan Humphreys, 1988).

Berkas elektron yang telah difokuskan kemudian dipindai (*scan*) secara sistematis pada permukaan sampel menggunakan kumparan pemindai (*scanning coils*). Pemindaian dilakukan dalam pola raster, mirip dengan cara kerja televisi, yaitu bergerak dari kiri ke kanan dan dari atas ke bawah. Ketika berkas elektron mengenai permukaan sampel, terjadi interaksi yang kompleks menghasilkan berbagai sinyal, antara lain:

1. Elektron Sekunder (*Secondary Electrons*): Elektron dengan energi rendah (< 50 eV) yang dihasilkan dari ionisasi atom permukaan. Elektron sekunder memberikan informasi topografi permukaan dengan resolusi tinggi.

2. Elektron Hamburan Balik (*Backscattered Electrons*): Elektron primer yang dipantulkan kembali dari sampel dengan energi tinggi. Intensitas elektron hamburan balik bergantung pada nomor atom unsur, sehingga memberikan informasi komposisi kimia.
3. Sinar-X Karakteristik: Radiasi elektromagnetik yang dipancarkan ketika elektron dari kulit luar mengisi kekosongan di kulit dalam atom. Sinar-X karakteristik digunakan untuk analisis unsur melalui teknik *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (EDS).

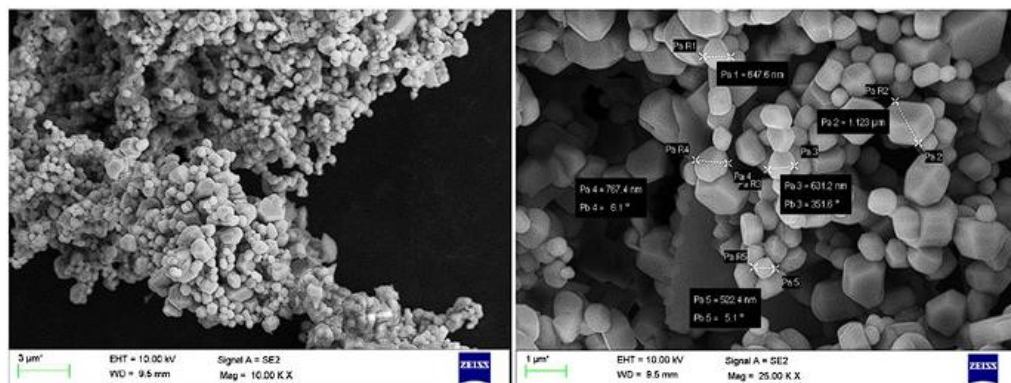
Sinyal-sinyal yang dihasilkan dari interaksi elektron dengan sampel dideteksi oleh detektor yang sesuai. Detektor elektron sekunder biasanya menggunakan detektor Everhart-Thornley, sedangkan elektron hamburan balik dideteksi oleh detektor solid-state (Reimer, 1998).

Intensitas sinyal yang terdeteksi pada setiap titik pemindaian dikonversi menjadi tingkat kecerahan pada layar monitor. Pemindaian yang sinkron antara berkas elektron pada sampel dan berkas elektron pada layar monitor menghasilkan gambaran permukaan sampel yang diperbesar (Goodhew dan Humphreys, 1988). Alat SEM ditunjukkan oleh **Gambar 2.8**.



Gambar 2.8 Alat SEM (Wikipedia, 2024).

Pada penelitian yang dilakukan Geetha *et al* (2016) menggunakan getah tanaman *Euphorbia Jatropha* sebagai agen pereduksi. Nanopartikel ZnO yang dihasilkan kemudian di karakterisasi menggunakan SEM, dengan hasil pengamatan ditunjukkan pada **Gambar 2.9**.



Gambar 2.9 Karakterisasi Nano ZnO menggunakan SEM (Geetha *et al.*, 2016)

Berdasarkan **Gambar 2.9** partikel ZnO yang terbentuk menunjukkan morfologi yang cukup baik, dimana sebagian partikel memiliki bentuk heksagonal. Ukuran kristal rata – rata ditentukan melalui histogram hasil analisis citra SEM menggunakan perangkat lunak ImageJ. Dari histogram SEM tersebut, kebanyakan partikel berada pada orde ukuran sekitar 500 nm, dimana terdapat perbedaan ukuran yang diperoleh dengan XRD (18 nm). Hal ini karena gambar yang dihasilkan oleh hanya dari sebagian kecil area sampel, sehingga bagian yang teramati merupakan partikel dengan ukuran partikel yang relatif lebih besar.

2.7 Penelitian Terkait

Penelitian terkait sintesis nanopartikel ZnO dengan berbagai metode telah banyak dilakukan, salah satunya menggunakan metode green synthesis. Beberapa peneliti telah berhasil melakukan sintesis dengan metode green synthesis menggunakan berbagai jenis tumbuhan untuk disintesis. Nurcahayaniati, (2023) telah melakukan penelitian mengenai sintesis nanopartikel ZnO dengan metode green synthesis menggunakan daun sirih merah (*Piper crocatum*). Penelitian tersebut dilakukan untuk mengetahui pengaruh pemberian variasi NaOH terhadap pembentukan

nanopartikel ZnO serta mengetahui hasil karakterisasi nanopartikel ZnO. Variasi NaOH yang digunakan yaitu 0,2 M, 0,4 M, 0,6 M dan 1,0 M. Hasil dari sintesis yang didapatkan kemudian dikarakterisasi menggunakan FTIR, XRD, UV-Vis dan SEM. Pada penelitian ini konsentrasi dari penambahan NaOH divariasikan dan didapatkan bahwa variasi NaOH mempengaruhi ukuran partikel dan kristalinitas dari sampel, dan didapatkan juga bahwa variasi NaOH 1 M menjadi yang paling baik.

Ukuran rata-rata partikel diperoleh berkisar 16 nm sampai dengan 24 nm yang dihitung menggunakan persamaan *Debye Scherrer*, atau rata-rata ukuran partikel tersebut adalah 20 nm. Hasil ini didapat berdasarkan karakterisasi dengan XRD dan diperkuat dari hasil analisis menggunakan SEM. Karakterisasi FTIR juga dilakukan untuk mengidentifikasi gugus fungsi nanopartikel ZnO. Karakterisasi menunjukkan bahwa puncak ZnO berada pada panjang gelombang 500-400 cm^{-1} yang mengindikasikan bahwa keberhasilan terbentuknya nanopartikel ZnO. Hasil FTIR juga menunjukkan adanya senyawa protein, fenol, dan polifenol sebagai capping agent saat sintesis. Kemudian karakterisasi yang dilakukan menggunakan UV-Vis DRS menunjukkan hasil rata-rata energi gap terhitung sebesar 3,36 eV, dan puncak serapan pada panjang gelombang maksimum sebesar 331 nm. Nilai panjang gelombang yang dihasilkan sudah termasuk kedalam kriteria ZnO yaitu 300-800 nm. Sehingga, dengan demikian nanopartikel ZnO yang didapatkan pada penelitian ini dapat digunakan sebagai material semikonduktor celah pita lebar yang lebih baik dibanding semikonduktor konvensional.

Perkembangan penelitian mengenai sintesis nanopartikel ZnO dengan metode biosintesis juga telah semakin berkembang. Penambahan atom lain atau doping kedalam bahan semikonduktor dengan logam transisi merupakan cara yang efektif untuk meningkatkan konduktivitas material tersebut. Meldayani *et al.*, (2022) telah melakukan penelitian mengenai sintesis nanopartikel ZnO yang didoping dengan perak (Ag) menggunakan metode biosintesis. Penelitian tersebut menggunakan ekstrak kulit buah nanas sebagai agen reduktor. Penelitian yang dilakukan bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan variasi Ag pada pembentukan nanopartikel ZnO. Variasi persentase Ag terhadap ZnO yaitu 1%, 3%, dan 5%

dengan ekstrak buah nanas dicampur larutan prekursor 0,05 M $(\text{Zn}(\text{NO}_3)_2) \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dan 0,05 M AgNO_3 . Hasil dari biosintesis yang didapat kemudian dikarakterisasi menggunakan XRD dan SEM.

Analisis Spektroskopi UV-Vis menunjukkan bahwa terjadi penyerapan kuat pada panjang gelombang di bawah 400 nm. Sampel ZnO dengan persentase Ag 3% menunjukkan tingkat absorbansi yang maksimum, sedangkan sampel ZnO murni menunjukkan tingkat absorbansi yang minimum. Karakterisasi XRD juga dilakukan untuk mengetahui struktur kristal yang terbentuk pada nanopartikel ZnO. Hasil karakterisasi menunjukkan bahwa semua sampel memiliki tujuh puncak difraksi pada sudut 2θ , dengan hasil analisis sesuai dengan *Ignoric Crystal Structure Database* dan memiliki struktur kristal heksagonal wurtzite. Analisis SEM memperlihatkan morfologi sampel mengalami perubahan setelah penambahan doping Ag, dimana partikel tersusun oleh gugus kecil berstruktur heksagonal wurtzite. Sampel ZnO dengan konsentrasi Ag 1% berbentuk seperti bunga dan bulan sferikal, dan pada Ag 3% dan 5% berbentuk seperti batuan karang.

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Waktu pada penelitian ini dilaksanakan pada bulan Januari 2025 sampai dengan Maret 2025, bertempat di Laboratorium Fisika Material, Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung, Laboratorium Kesehatan Daerah Provinsi Lampung (LABKESDA) dan UPT Laboratorium Terpadu, Universitas Negeri Padang.

3.2 Alat dan Bahan Penelitian

3.2.1 Alat

Alat yang digunakan dalam penelitian ini diantaranya gelas *beaker*, gelas ukur, timbangan, *hotplate*, *magnetic stirrer*, kertas Whatman no. 1, spatula, *chopper* elektrik, mikropipet, aluminium *foil*, plastik *wrapping*, pemanas elektrik, kertas pH meter, kompor listrik, serta mortar dan *pestle*.

3.2.2 Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini diantaranya daun sirih merah (*Piper crocatum*), seng nitrat heksahidrat ($Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) 98% *merck* ROFA, etanol 70% *merck* ROFA, aquabides, NaOH 99% *merck* ROFA dan $AgNO_3$ 99% *merck* ROFA.

3.3 Prosedur Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan beberapa tahapan yaitu pembuatan larutan ekstrak daun sirih merah, sintesis nanopartikel ZnO, karakterisasi nanopartikel ZnO, dan uji antibakteri.

3.3.1 Pembuatan Ekstrak Daun Sirih Merah

Pembuatan ekstrak daun sirih merah dilakukan dengan beberapa tahapan sebagai berikut:

1. Alat dan bahan yang dibutuhkan dalam pembuatan ekstrak daun sirih merah dipersiapkan. Adapun alat dan bahan yang perlu disiapkan seperti daun sirih merah, *chopper* elektrik, gelas *beaker* ukuran 500 ml, pemanas listrik, kertas saring Whatman no.1, dan aquabides.
2. Daun sirih merah dicuci bersih dengan air mengalir untuk menghilangkan kotoran yang menempel, kemudian dicuci kembali dengan aquabides sebanyak 2 kali.
3. Daun sirih merah kemudian dihaluskan menggunakan *chopper* elektrik hingga berbentuk potongan - potongan kecil.
4. Potongan - potongan kecil daun dikeringkan dibawah sinar matahari untuk menghilangkan kadar air.
5. Potongan - potongan kecil daun kering dihaluskan kembali dengan *chopper* elektrik hingga berbentuk bubuk.
6. Bubuk yang didapat kemudian ditimbang sebanyak 20 gram dan ditambahkan aquabides sebanyak 100 ml ke dalam gelas *beaker* ukuran 500 ml.
7. Gelas *beaker* yang telah terisi kemudian ditutup menggunakan aluminium *foil* lalu dipanaskan dan di-*stirrer* menggunakan pemanas elektrik dan *stirrer* selama 20 menit dengan suhu 60 °C.
8. Ekstrak daun kemudian didinginkan hingga suhu ruang untuk dilakukan penyaringan dan pengecekan pH ekstrak.
9. Ekstrak disaring menggunakan kertas saring Whatman no.1 untuk memisahkan ekstrak daun dan ampas.
10. Ekstrak dapat digunakan untuk sintesis nanopartikel ZnO.

3.3.2 Sintesis Nanopartikel ZnO

Nanopartikel ZnO disintesis menggunakan metode *green synthesis* yang dilakukan dengan tahapan sebagai berikut:

1. Sebanyak 100 ml ekstrak daun sirih merah dituangkan kedalam gelas *beaker*, lalu ditambahkan larutan seng nitrat heksahidrat ($\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) sebanyak 200 ml.
2. Gelas *beaker* yang terisi ekstrak daun dan larutan seng nitrat heksahidrat kemudian dipanaskan dan diaduk menggunakan *hotplate* dan *magnetic stirrer* selama kurang lebih 30 menit.
3. Larutan didinginkan hingga suhu ruang dan diukur pH-nya.
4. Larutan kemudian ditambahkan larutan AgNO_3 dengan variasi 10 ml, 20 ml, dan 30 ml lalu dipanaskan dan diaduk kembali menggunakan *magnetic stirrer* selama 20 menit.
5. Larutan didinginkan hingga suhu ruang.
6. Larutan diaduk kembali tanpa pemanasan sambil ditetesi NaOH 1M menggunakan mikropipet dan diukur pH-nya hingga mencapai rentang pH 8 - 12.
7. Larutan dibiarkan selama 24 jam sambil diaduk menggunakan *magnetic stirrer*.
8. Larutan kemudian disentrifugasi untuk memisahkan larutan dan endapannya. Sentrifugasi selama 3 kali pencucian menggunakan etanol 70%.
9. Endapan yang didapat kemudian diletakkan di wadah, lalu dipanaskan menggunakan oven bersuhu 90 °C hingga kering.
10. Endapan kering kemudian dihaluskan menggunakan mortar dan *pestle* hingga berbentuk bubuk.
11. Bubuk dapat digunakan untuk karakterisasi dan uji antibakteri.

Adapun perbandingan variasi AgNO_3 dan komposisi bahan sintesis nanopartikel ZnO ditunjukkan pada **Tabel 3.1**.

Tabel 3.1 Variasi AgNO₃ dan komposisi bahan

Sampel	Ekstrak Daun (ml)	Zn(NO ₃) ₂ .6H ₂ O (ml)	AgNO ₃ (ml)
A	100	200	0
B	100	200	10
C	100	200	20
D	100	200	30

3.4 Uji Aktivitas Antibakteri Nanopartikel ZnO

Uji aktivitas antibakteri pada nanopartikel ZnO dari hasil sintesis dilakukan terhadap bakteri *Escherichia coli* menggunakan metode sumuran dengan prosedur sebagai berikut:

3.4.1 Tahapan Preparasi Media *Mueller Hinton Agar*

Tahapan preparasi media *Mueller Hinton Agar* dilakukan dengan prosedur sebagai berikut:

1. Menimbang 38 gram serbuk Mueller Hinton Agar dan dilarutkan dalam 1000 ml aquades steril dalam erlenmeyer lalu diaduk hingga homogen dengan *magnetic stirrer*.
2. Media disterilkan menggunakan autoklaf pada suhu 121 °C dengan tekanan 15 psi selama 15 menit.
3. Media didinginkan hingga suhu 45-50 °C.
4. Media dituangkan ke dalam cawan petri steril di dalam Laminar Air Flow (LAF) sebanyak 20-25 ml per cawan (ketebalan ± 4 mm) hingga merata dan tidak ada gelembung udara.
5. Media dibiarkan mengeras pada suhu ruang.

3.4.2 Tahapan Preparasi Kultur Bakteri dan Pembuatan Suspensi Bakteri

Tahapan preparasi kultur bakteri dan pembuatan suspensi bakteri dilakukan dengan prosedur sebagai berikut:

1. Mengambil kultur bakteri dan *streak* kultur pada nutrient agar menggunakan ose steril.
2. Inkubasi pada suhu 37 °C selama 18-24 jam, lalu mengamati koloni yang tumbuh dan memilih koloni yang segar dan khas.

3. Mengambil 3-5 koloni bakteri yang seragam dengan ose steril dan suspensikan dalam 5 ml larutan saline steril.
4. Menghomogenkan suspensi dengan vortex selama 15 detik.
5. Menyesuaikan tingkat kekeruhan dengan standar McFarland 0,5.
6. Mengukur absorbansi pada spektrofotometer.

3.4.3 Inokulasi Bakteri pada Media

Tahapan inokulasi bakteri pada media dilakukan dengan prosedur sebagai berikut:

1. Swab kapas steril dicelupkan ke dalam suspensi bakteri.
2. Mengoleskan swab pada seluruh permukaan MHA secara merata.
3. Pengolesan diulang sebanyak 3 kali dan dibiarkan mengering selama 3-5 menit.

3.4.4 Penempatan Cakram pada Media dan Inkubasi

Tahapan penempatan cakram pada media dan inkubasi dilakukan dengan prosedur sebagai berikut:

1. Mengambil cakram menggunakan pinset steril.
2. Cakram diletakkan pada permukaan media yang telah diinokulasi.
3. Ditekan perlahan untuk memastikan kontak baik dengan media.
4. Cakram dilabeli dengan spidol.
5. Menutup kembali cawan petri dengan rapat dan membalikkan posisi cawan agar menghadap ke bawah.
6. Menginkubasi pada suhu 37 °C selama 18-24 jam.

3.4.5 Pengamatan dan Pengukuran

Tahapan pengamatan dan pengukuran dilakukan dengan prosedur sebagai berikut:

1. Cawan dikeluarkan dari inkubator setelah 18-24 jam.
2. Zona hambat diamati dengan melihat area jernih di sekitar setiap cakram.
3. Pengukuran zona hambat dilakukan menggunakan jangka sorong serta dengan pencahayaan yang bagus.
4. Hasil pengukuran dicatat.

3.5 Karakterisasi Sampel ZnO

Sampel yang diperoleh selanjutnya dikarakterisasi menggunakan:

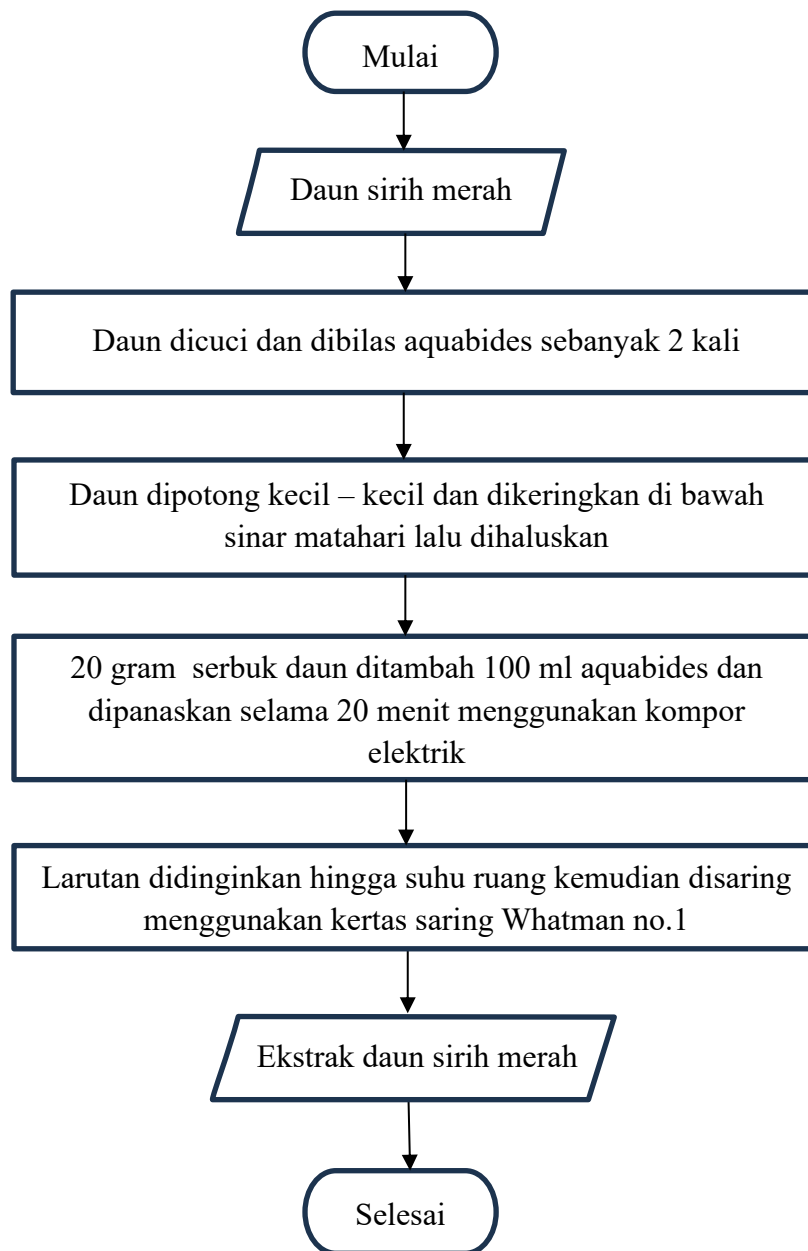
1. XRD *merk* Thermoscientific untuk mengetahui struktur kristal yang terbentuk pada nanopartikel ZnO.
2. SEM *merk* ZEISS EVO MA 10 untuk mengetahui struktur morfologi pada nanopartikel ZnO.

3.6 Diagram Alir

Diagram alir dari penelitian ini terdiri dari tahapan pembuatan ekstrak daun sirih merah, sintesis nanopartikel ZnO, dan uji aktivitas antibakteri.

3.6.1 Diagram Alir Pembuatan Ekstrak Daun Sirih Merah

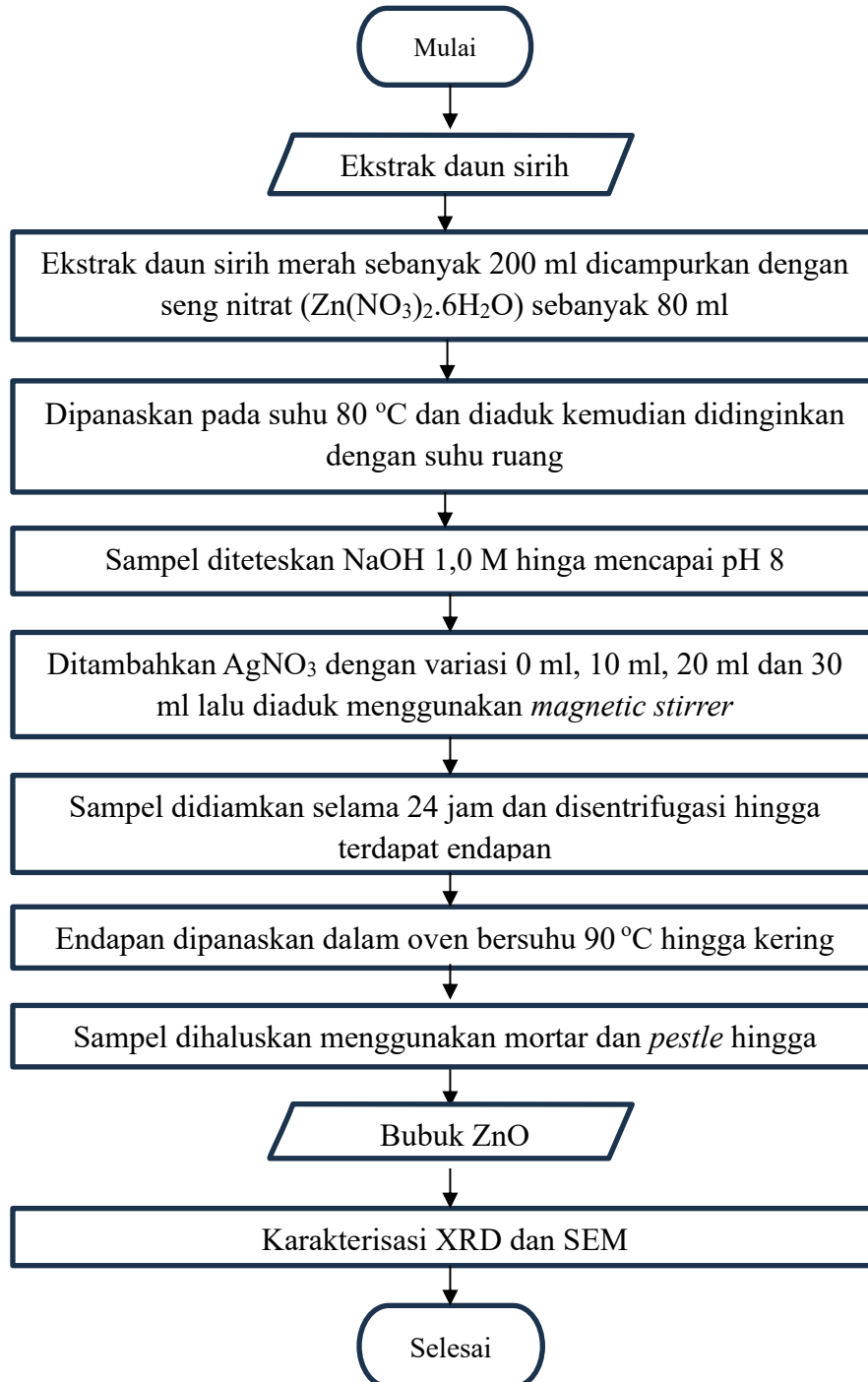
Diagram alir pembuatan ekstrak daun sirih merah ditunjukkan pada **Gambar 3.1**.



Gambar 3.1 Diagram alir pembuatan ekstrak daun sirih merah.

3.6.2 Diagram Alir Sintesis Nanopartikel ZnO

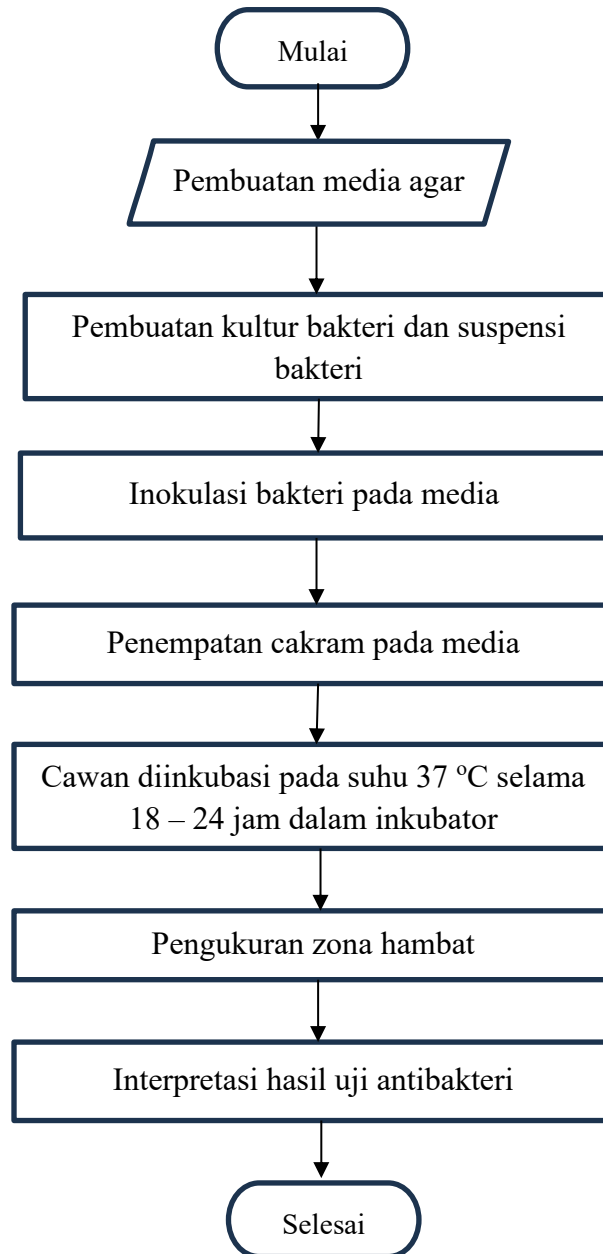
Diagram alir proses sintesis nanopartikel ZnO ditunjukkan pada **Gambar 3.2**



Gambar 3.2 Diagram alir sintesis nanopartikel ZnO.

3.6.3 Diagram Alir Uji Aktivitas Antibakteri

Diagram alir uji aktivitas antibakteri ditunjukkan pada **Gambar 3.3**.



Gambar 3.3 Diagram alir uji aktivitas antibakteri.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian tentang “Pengaruh Doping Perak Nitrat (AgNO_3) pada Nanopartikel Seng Oksida (ZnO) yang Disintesis Menggunakan Ekstrak Daun Sirih Merah (*Piper crocatum*) terhadap Aktivitas Antibakteri”, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Hasil analisis XRD menunjukkan bahwa nanopartikel ZnO dan ZnO/Ag berhasil disintesis dengan fasa utama wurtzite ZnO . Pada sampel dengan doping AgNO_3 teridentifikasi keberadaan fasa Ag dan NaNO_3 . Parameter kisi menunjukkan sedikit perubahan dengan kecenderungan menurun seiring peningkatan konsentrasi doping Ag , yang mengindikasikan adanya substitusi sebagian ion Zn^{2+} oleh ion Ag^+ dalam kisi kristal ZnO . Analisis *rietveld refinement* juga memperlihatkan nilai R_p , R_{wp} dan GOF berada di bawah batas standar, menandakan kesesuaian yang baik antara model dan data penelitian. Sementara itu, hasil pengamatan SEM menunjukkan morfologi partikel yang tidak beraturan menyerupai batuan karang dan cenderung mengalami aglomerasi, yang menyebabkan partikel – partikel bergabung membentuk ukuran agregat lebih besar.
2. Variasi konsentrasi AgNO_3 berpengaruh signifikan terhadap zona hambat antibakteri *Escherichia coli*. Hasil uji antibakteri menunjukkan bahwa penambahan doping AgNO_3 berpengaruh terhadap peningkatan zona hambat terhadap pertumbuhan bakteri.

5.2 Saran

Penelitian lebih lanjut diperlukannya optimasi AgNO_3 untuk memperoleh ukuran kristal dan aktivitas antibakteri yang lebih stabil. Uji antibakteri juga sebaiknya dilakukan terhadap bakteri gram positif dan gram negatif untuk mengetahui efektivitas antibakteri yang lebih luas.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdelmijid, S., Karim, M., & Bensouici, A. (2022). Influence of size and morphology on the antibacterial activity of zinc oxide nanoparticles. *Materials Science and Engineering C*, 131, 314–320.
- Anastas, P. T., & Warner, J. C. (2000). *Green chemistry: Theory and practice*. Oxford University Press. 3-4.
- Azam, A., Ahmed, A. S., Oves, M., Khan, M. S., Habib, S. S., & Memic, A. (2012). Antimicrobial activity of metal oxide nanoparticles against Gram-positive and Gram-negative bacteria: A comparative study. *International Journal of Nanomedicine*, 7, 128–135.
- Bhusan, B. (2016). *Encyclopedia of Nanotechnology 2nd Edition*. Springer Netherlands. 16.
- Bhuyan, D. J., Mishra, R. K., Tripathy, S., Chandrasekaran, N., & Prasad, R. (2015). Green synthesis of zinc oxide nanoparticles using plant extracts and their characterization. *Journal of Nanobiotechnology*, 13, 103–105.
- Brus, L. E. (1984). Electron-electron and electron-hole interactions in small semiconductor crystallites: The size dependence of the lowest excited electronic state. *The Journal of Chemical Physics*. 80(9). 4403-4409.
- Chaveerach, A., Mookkamul, P., Sudmoon, R., & Tanee, T. (2006). Ethnobotany of the genus Piper (Piperaceae) in Thailand. *Ethnobotany Research & Applications*, 4, 223–231.
- Chitradevi, S., Anitha, A., & Kavitha, T. (2020). Effect of Ag doping on structural and antibacterial properties of ZnO nanoparticles. *Journal of Nanoscience and Technology*. 6(3). 45–52.
- Comini, E. (2006). Metal oxide nano-crystals for gas sensing. *Analytica Chimica Acta*. 568(1–2). 28–40.

- Cullity, B. D. (1978). *Elements of X-ray Diffraction* (2nd ed.). Addison-Wesley Publishing Company Inc. London. 99-102.
- Dean, J. A. (1999). *Lange's handbook of chemistry* (15th ed.). McGraw-Hill. 112-114.
- Dobrucka, R. (2018). Synthesis of zinc oxide nanoparticles using plant extracts. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 15, 1024–1025.
- Dwivedi, A. D., & Tripathi, D. K. (2014). Synthesis of green metallic nanoparticles using plant extracts and their applications: A review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 11(5), 5455–5486.
- Elumalai, K., & Velmurugan, S. (2015). Green synthesis, characterization and antimicrobial activities of zinc oxide nanoparticles from the leaf extract of *Azadirachta indica* (L.). *Applied Surface Science*. 345. 329–336.
- Feng, Q. L., Wu, J., Chen, G. Q., Cui, F. Z., Kim, T. N., & Kim, J. O. (2000). A mechanistic study of the antibacterial effect of silver ions on *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*. *Journal of Biomedical Materials Research*. 52(4), 662–668.
- Geetha, M.S.N, Nagabhushana, H. and Shivananjaiah, H.N. 2016. Green Mediated Synthesis and Characterization of ZnO Nanoparticles Using Euphorbia Jatropa Latex as Reducing Agent. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*.1(3). 301-310.
- Geetha, M., Anburajan, M., & Vijayakumar, K. (2016). Green synthesis of ZnO nanoparticles using Euphorbia jatropa latex: Characterization and antimicrobial activity. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 49, 78–81.
- Ghosh, S., Mukherjee, P., & Chandrasekaran, N. (2012). Enhanced antibacterial activity of silver-doped ZnO nanoparticles: A synergistic study. *Journal of Nanobiotechnology*, 10, 100–105.
- Goldstein, J.I., Newbury, D.E., Echlin, P., Joy, D.C., Romig Jr, A.D., Lyman, C.E., Fiori, C., dan Lifshin, E. (1992). *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis*. 2nd Edition. New York: Plenum Press. 45-48.
- Goodhew, P.J. dan Humphreys, F.J. 1988. *Electron Microscopy and Analysis*. 2nd Edition. London: Taylor & Francis. 12-15.
- Gunarti, A., & Utari, D. (2018). Antibacterial activity of Piper crocatum leaf extracts against *Escherichia coli*. *Journal of Pharmaceutical and Biological Sciences*, 6(2), 45–47.

- Hanley, C., Layne, J., Punnoose, A., Reddy, K. M., Coombs, I., Coombs, A., Feris, K., & Wingett, D. (2008). Preferential killing of cancer cells and activated human T cells using ZnO nanoparticles. *Nanotechnology*, 19(29), 7-9.
- Hu, C., Lan, Y., Qu, J., Hu, X., & Wang, A. (2007). Ag/AgBr/TiO₂ visible light photocatalyst for destruction of azodyes and bacteria. *Journal of Physical Chemistry B*, 110(9), 4066–4072.
- Jain, K. K. (2012). Applications of nanobiotechnology in clinical diagnostics. *Clinical Chemistry*, 58(3), 563–573.
- Jamdagni, P., Khatri, P., & Rana, J. S. (2018). Green synthesis of zinc oxide nanoparticles using flower extract of *Nyctanthes arbor-tristis* and their antifungal activity. *Journal of King Saud University – Science*, 30(2), 169–170.
- Januarti, I. B., Wijayanti, R., Wahyuningsih, S., & Nisa, Z. (2019). Potensi ekstrak terpurifikasi daun sirih merah (*Piper crocatum* Ruiz & Pav) sebagai antioksidan dan antibakteri. *Journal of Pharmaceutical Science and Clinical Research*, 4(2), 60–68.
- Janotti, A., & Van De Walle, C. G. (2009). Fundamentals of zinc oxide as a semiconductor. *Reports on Progress in Physics*, 72(12), 4-8.
- Jiang, J., Pi, J., & Cai, J. (2018). The Advancing of Zinc Oxide Nanoparticles for Biomedical Applications. *Bioinorganic Chemistry and Applications*, 20(18), 1-18.
- Jung, W. K., Koo, H. C., Kim, K. W., Shin, S., Kim, S. H., & Park, Y. H. (2008). Antibacterial activity and mechanism of action of silver ions on *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 18, 85–91.
- Kalpana, V. N., Kataru, B. A. S., Sravani, N., Vigneshwari, T., Panneerselvam, A., & Devi Rajeswari, V. (2018). Biosynthesis of zinc oxide nanoparticles using culture filtrates of *Aspergillus niger*: Antimicrobial textiles and dye degradation studies. *OpenNano*, 3, 50-52.
- Kamat, P. V. (2002). Photophysical, photochemical and photocatalytic aspects of metal nanoparticles. *The Journal of Physical Chemistry B*, 106(32), 7729–7744.
- Karunakaran, C., Rajeswari, V., & Gomathisankar, P. (2015). Enhanced photocatalytic and antibacterial activities of Ag-doped ZnO nanoparticles prepared by a facile method. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 30, 677–688.

- Kavitha, K. S., Baker, S., Rakshith, D., Kavitha, H. U., C, Y. R. H., Harini, B. P., & Satish, S. (2013). Plants as Green Source towards Synthesis of Nanoparticles. *2(6)*, 66–76.
- Kim, J. S., Kuk, E., Yu, K. N., et al. (2007). Antimicrobial effects of silver nanoparticles. *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine*. *3(1)*, 95–101.
- Kumar, R., Sharma, P., & Singh, A. (2022). Antibacterial efficacy of silver-doped zinc oxide nanoparticles against multidrug-resistant bacterial pathogens. *Journal of Applied Microbiology*, *133*, 155–157.
- Li, H. X., Widowati, W., Azis, R., Yang, S. Y., Kim, Y. H., & Li, W. (2019). Chemical constituents of the Piper crocatum leaves and their chemotaxonomic significance. *Biochemical Systematics and Ecology*, *86*, 103905.
- Lu, Y., Yin, Y., Mayers, B. T., & Xia, Y. (2012). Modifying the surface properties of superparamagnetic iron oxide nanoparticles through a sol-gel approach. *Nano Letters*, *2(3)*, 183–186.
- Masta, A. (2020). *Nanotechnology and nanomaterials: Synthesis, properties and applications*. Springer. 15-18.
- Matinise, N., Fuku, X. G., Kaviyarasu, K., Mayedwa, N., & Maaza, M. (2017). ZnO nanoparticles via Moringa oleifera green synthesis: Physical properties & mechanism of formation. *Applied Surface Science*, *406*, 341–346.
- Meldayani, A., Pratama, R., & Lestari, D. (2022). Biosynthesis of Ag-doped ZnO nanoparticles using pineapple peel extract: Effect of silver concentration on particle formation and characterization. *Journal of Green Nanotechnology*, *7(2)*, 77–80.
- Mittal, A. K., Chisti, Y., & Banerjee, U. C. (2013). Synthesis of metallic nanoparticles using plant extracts. *Biotechnology Advances*, *31(2)*, 346–356.
- Nel, A., Xia, T., Mädler, L., & Li, N. (2006). Toxic potential of materials at the nano level. *Science*, *311(5761)*, 622–627.
- Ningsih, F., Rahmawati, L., & Santoso, P. (2013). In vitro antibacterial effect of Piper crocatum leaf extract on Streptococcus mutans. *Indonesian Journal of Dental Research*, *2(1)*, 23–25.
- Norris, D. J., Efros, A. L., & Erwin, S. C. (2008). Doped nanocrystals. *Science*, *319(5871)*, 1776–1779.

- Nurcahayaniati, H. (2023). Pengaruh Variasi Naoh Pada Sintesis Nanopartikel Seng Oksida (ZnO) Menggunakan Ekstrak Daun Sirih Merah (Piper Crocatum) Dengan Metode Green Synthesis. (*Skripsi*, Universitas Lampung).
- Özgür, Ü., Alivov, Y. I., Liu, C., Teke, A., Reshchikov, M. A., Doğan, S., Avrutin, V., Cho, S. J., & Morkoç, H. (2005). A comprehensive review of ZnO materials and devices. *Journal of Applied Physics*, 98(4), 3-6.
- Pasquet, J., Paquot, A., Leveque, P., & Delattre, C. (2014). Antibacterial mechanisms of ZnO nanoparticles against Gram-positive and Gram-negative bacteria. *Journal of Nanoparticle Research*, 16, 214–220.
- Pearton, S. J., Heo, W. H., Ivill, M., Norton, D. P., & Steiner, T. (2004). Dilute magnetic semiconducting oxides. *Semiconductor Science and Technology*, 19(10), 59-74.
- Peng, X. G. Wickham, J. Alivisatos, A. P. (1998). Kinetics of II-VI and III-V colloidal semiconductor nanocrystal growth. *Journal of the American Chemical Society*, 120(21), 5343.
- Puspita, D., Haryanti, D., & Rahmawati, F. (2018). Phytochemical constituents and biological activities of Piper crocatum: Potential applications in medicine and nanotechnology. *Journal of Herbal Medicine*, 12, 112–115.
- Raghupathi, K. R., Koodali, R. T., & Manna, A. C. (2011). Size-dependent bacterial growth inhibition and mechanism of antibacterial activity of zinc oxide nanoparticles. *Langmuir*, 27(7), 4020–4028.
- Rai, M., Yadav, A., & Gade, A. (2012). Silver nanoparticles as a new generation of antimicrobials. *Biotechnology Advances*, 27(1), 76–83.
- Rajiv, P., Rajeshwari, S., & Venckatesh, R. (2013). Bio-Fabrication of zinc oxide nanoparticles using leaf extract of Parthenium hysterophorus L. and its size-dependent antifungal activity against plant fungal pathogens. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 112, 385–386.
- Reimer, L. (1998). *Scanning Electron Microscopy: Physics of Image Formation and Microanalysis* (2nd ed.). Springer. 45–48.
- Rhamdiyah, F. K., & Maharani, D. K. (2022). Biosynthesis of ZnO Nanoparticles from Aqueous Extract of Moringa Oleifera L.: Its Application as Antibacterial and Photocatalyst. *Indonesian Journal of Chemical Science*, 11(2), 91–102.
- Salehi, B., Zakaria, Z. A., Gyawali, R., Ibrahim, S. A., Rajkovic, J., Shinwari, Z. K., Khan, T., Sharifi-Rad, J., Ozleyen, A., Turkdonmez, E., Valussi, M., Tumer, T. B., Monzote Fidalgo, L., Martorell, M., & Setzer, W. N. (2019).

- Piper species: A comprehensive review on their phytochemistry, biological activities and applications. *Molecules*, 24(7), 1364.
- Sangeetha, G., Rajeshwari, S., & Venckatesh, R. (2011). Green synthesis of zinc oxide nanoparticles by aloe barbadensis miller leaf extract: Structure and optical properties. *Materials Research Bulletin*, 46(12), 2563–2564.
- Saravanadevi, K., Kavitha, M., Karpagavinayagam, P., Saminathan, K., & Vedhi, C. (2019). Biosynthesis of ZnO and Ag doped ZnO nanoparticles from *Vitis vinifera* leaf for antibacterial, photocatalytic application. *Materials Today: Proceedings*, 48, 352–356.
- Sawada, H., Wang, R., & Sleight, A. W. (1996). Anisotropic thermal expansion of wurtzite-type ZnO. *Journal of Solid State Chemistry*, 122(1), 148–150.
- Sawyer, L., & Grubb, D. T. (1987). *Scanning Electron Microscopy: Principles and Applications*. Academic Press. 35–37.
- Shannon, R. D. (1976). Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides. *Acta Crystallographica Section A*, 32(5), 751–767.
- Sharma, P. K., Dutta, R. K., & Pandey, A. C. (2009). Doping dependent room-temperature ferromagnetism and structural properties of dilute magnetic semiconductor ZnO:Cu²⁺ nanorods. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 321(24), 4001–4005.
- Sharma, R., Verma, A., & Singh, P. (2019). Influence of NaOH and AgNO₃ addition on the formation of ZnO-Ag nanoparticles and secondary phases. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 30, 215–218.
- Siddiqi, K. S., & Husen, A. (2016). Fabrication of Metal Nanoparticles from Fungi and Metal Salts: Scope and Application. *Nanoscale Research Letters*, 11(1), 1–15.
- Siddiqi, K. S., ur Rahman, A., Tajuddin, & Husen, A. (2018). Properties of Zinc Oxide Nanoparticles and Their Activity Against Microbes. *Nanoscale Research Letters*, 13, 141.
- Sirelkhatim, A., Mahmud, S., Seeni, A., Kaus, N. H. M., Ann, L. C., Bakhori, S. K. M., Hasan, H., & Mohamad, D. (2015). Review on zinc oxide nanoparticles: Antibacterial activity and toxicity mechanism. *Nano-Micro Letters*, 7(3), 219–242.
- Siswina, T., Rustama, M. M., Sumiarsa, D., & Kurnia, D. (2023). Phytochemical profiling of *Piper crocatum* and its antifungal mechanism action as Lanosterol 14 alpha demethylase CYP51 inhibitor: a review. *F1000Research*, 11, 1115.

- Smallman, R. E., & Bishop, R. J. (2000). *Modern Physical Metallurgy and Materials Engineering* (6th ed.). Butterworth-Heinemann. pp. 56–58.
- Suresh, P., Kumar, S., & Ramesh, P. (2020). Effect of calcination conditions on the formation of ZnO nanoparticles and secondary phases. *Materials Chemistry and Physics*, 245, 410–412.
- Vijayaraghavan, K., & Ashokkumar, T. (2017). Plant-mediated biosynthesis of metallic nanoparticles: A review of literature, factors affecting synthesis, characterization techniques and applications. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(5), 4866–4883.
- Wan, Q., Xiong, Z., Dai, J., Rao, J., & Jiang, F. (2008). First-principles study of Ag-based p-type doping difficulty in ZnO. *Optical Materials*, 30(6), 817–821.
- Wang, Z. L. (2004). Zinc oxide nanostructures: Growth, properties and applications. *Journal of Physics Condensed Matter*, 16(25), 830-835.
- Yuvakkumar, R., Suresh, J., Nathanael, A. J., Sundrarajan, M., & Hong, S. I. (2014). Novel green synthetic strategy to prepare ZnO nanocrystals using rambutan (*Nephelium lappaceum* L.) peel extract and its antibacterial applications. *Materials Science and Engineering C: Materials for Biological Applications*, 41, 24–25.
- Zhang, L., Jiang, Y., Ding, Y., Povey, M., & York, D. (2008). Investigation into the antibacterial behavior of suspensions of ZnO nanoparticles (ZnO nanofluids). *Journal of Nanoparticle Research*, 9(3), 479–489.