

**APLIKASI *NANO FERTILIZER* ZINK (ZnO-NP) SINTESIS MIMBA
(*Azadirachta indica*) TERHADAP KANDUNGAN PROLIN KEDELAI
(*Glycine max* L.) PADA STRES KEKERINGAN**

SKRIPSI

**OLEH
NOFAL ALDI HUSAINI
NIM. 220602110135**



**PROGRAM STUDI BIOLOGI
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2026**

**APLIKASI *NANO FERTILIZER* ZINK (ZnO-NP) SINTESIS MIMBA
(*Azadirachta indica*) TERHADAP KANDUNGAN PROLIN KEDELAI
(*Glycine max* L.) PADA STRES KEKERINGAN**

SKRIPSI

**OLEH
NOFAL ALDI HUSAINI
NIM. 220602110135**

HALAMAN JUDUL

**Diajukan Kepada:
Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang
Untuk Memenuhi Salah Satu Persyaratan
Dalam Memperoleh Gelar Sarjana Sains (S.Si)**

**PROGRAM STUDI BIOLOGI
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2026**

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Nofal Aldi Husaini
NIM : 220602110135
Program Studi : Biologi
Judul Skripsi : Aplikasi *Nano Fertilizer* Zink (ZnO-NP) Sintesis Mimba (*Azadirachta indica*) Terhadap Kandungan Prolin Kedelai (*Glycine max* L.) pada Stress Kekeringan

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji pada tanggal 19 Juni 2026 dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana pada Program Studi Biologi, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.

DEWAN PENGUJI

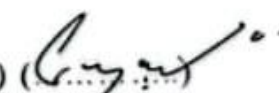
Pembimbing I : Prof. Dr. Evika Sandi Savitri, M.P
NIP. 19741018200312 2 002



Pembimbing II : Kivah Aha Putra, M.Pd.
NIPPPK. 19900425 202321 1 024



Tim Penguji : Suyono, M.P.
NIP. 19710622200312 1 002

(Ketua) 

Didik Wahyudi, M.Si
NIP. 19860102201801 1 001

(Anggota) 

Ketua Program Studi Biologi



Prof. Dr. Retno Susilowati, M.Si
NIP. 19671113 199402 2 001

HALAMAN PERSEMBAHAN

Hamdan wa Syukron Lillah, Sholaatan wa Salaaman 'ala Rosulillah.

Dengan rasa syukur kepada Allah SWT, skripsi ini dipersembahkan kepada semua pihak yang memberikan motivasi, dorongan, semangat dan doa kepada penulis dalam menyelesaikannya, khususnya kepada:

1. Kedua Orang Tua tercinta, Almarhum Bpk Usman dan Ibu Chalimah yang telah merawat, mendidik, mendukung, serta mendoakan dimanapun dan kapanpun sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik.
2. Seluruh Saudara dan saudarakiku tercinta
3. Ibu Prof. Dr. Evika Sandi Savitri, M.P, selaku dosen pembimbing skripsi yang telah meluangkan waktu, tenaga, bimbingan, arahan, nasehat dan yang memfasilitasi penelitian ini baik moral maupun materil, serta ilmu dengan penuh kesabaran sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan baik.
4. Kivah Aha Putra, M.Pd, selaku dosen pembimbing agama, yang telah meluangkan waktu, memberikan arahan, bimbingan, nasehat terutama pada bidang integrasi Islam dan Sains, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan baik.
5. Bapak Suyono, M.P, yang telah bersedia meluangkan waktu, memberikan kritik, saran, dan masukan dalam seminar proposal kepada penulis, sehingga skripsi ini dapat berjalan dengan semestinya, sesuai dengan kaidah penelitian dan penulisan yang baik.
6. Bapak Didik Wahyudi, M.Si, yang telah meluangkan waktu, bersedia memberikan kritik, saran, dan turut membantu dalam memfasilitasi pra penelitian ini, serta memberikan contoh bagaimana seharusnya penelitian itu berjalan. sehingga skripsi ini dapat berjalan dengan semestinya, sesuai dengan kaidah penelitian dan penulisan yang baik.
7. Bu Ruri Siti Resmisari, M.Si yang telah meluangkan waktu, bersedia memberikan kritik, saran, dan masukan selama penelitian ini berlangsung. Serta yang setiap harinya bertemu senantiasa memberikan semangat untuk menyelesaikan penelitian ini, sehingga peneliti senantiasa terdorong untuk selalu bangkit dalam *trial error penelitian*..
8. Teman-teman Kelas Biologi D “Dewa”, teman-teman Biologi angkatan 2022 “RAVENTALIZM” dan rekan seperjuangan yang memberikan semangat, kenangan, serta kegembiraan selama perkuliahan.
9. Rekan seproyek peneltian aplikasi nanopartikel ini, Sisil, Ahsani dan Vani yang bahu membahu untuk menyelesaikan penelitian ini bersama sama. Sehingga penelitian ini berjalan dengan baik

MOTTO

"Seng ati ati toh le"

-K.H. Soleh bahrudin-

PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Nofal Aldi Husaini
NIM : 220602110135
Program Studi : Biologi
Fakultas : Sains dan Teknologi
Judul Penelitian : Aplikasi Nano Fertilizer Zink (ZnO-NP) Sintesis Mimba (*Azadirachta indica*) Terhadap Kandungan Prolin Kedelai (*Glycine max L.*) Pada Stress Kekeringan

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri, bukan merupakan pengambilalihan data, tulisan atau pikiran orang lain yang saya akui sebagai hasil tulisan dan pikiran saya sendiri, kecuali dengan mencantumkan sumber cuplikan pada daftar pustaka. Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan skripsi ini hasil jiplakan, maka saya bersedia menerima sanksi akademik maupun hukum atas perbuatan tersebut.

Malang, 19 juni 2026

Yang membuat pernyataan,


Nofal Aldi Husaini
NIM. 220602110135

PEDOMAN PENGGUNAAN SKRIPSI

Skripsi ini tidak dipublikasikan namun terbuka untuk umum dengan ketentuan bahwa hak cipta ada pada penulis. Daftar pustaka diperkenankan untuk dicatat, tapi pengutipan hanya dapat dilakukan seizin penulis dan harus disertai kebiasaan ilmiah untuk menyebutkannya.

**APLIKASI NANO FERTILIZER ZINK (ZnO-NP) SINTESIS MIMBA
(*Azadirachta indica*) TERHADAP KANDUNGAN PROLIN KEDELAI
(*Glycine max* L.) PADA STRES KEKERINGAN**

Nofal Aldi Husaini, Evika Sandi Savitri, Kivah Aha Putra

Program Studi Biologi, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Maulana
Malik Ibrahim Malang

ABSTRAK

Kedelai (*Glycine max* L.) merupakan tanaman pangan penting, tetapi produktivitasnya dapat menurun akibat cekaman kekeringan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakter nanopartikel ZnO hasil sintesis ekstrak daun mimba (*Azadirachta indica*) serta pengaruh cekaman kekeringan dan aplikasi ZnO-NP terhadap kandungan prolin kedelai. Penelitian ini menggunakan Rancangan Acak Lengkap (RAL) faktorial dengan dua faktor, yaitu cekaman kekeringan yang terdiri atas 100%, 75%, dan 50% kapasitas lapang, serta pemupukan yang terdiri atas kontrol, ZnO-NP 100 ppm, ZnO-NP 200 ppm, ZnO-NP 300 ppm, dan ZnSO₄ 400 ppm. Nanopartikel dikarakterisasi menggunakan PSA dan FTIR, sedangkan kandungan prolin dianalisis pada panjang gelombang 520 nm dan data diuji menggunakan ANOVA dua arah. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nanopartikel ZnO berhasil disintesis dengan ukuran rata-rata 112,87 nm dan nilai PDI 0,201, yang menandakan partikel relatif homogen. Namun demikian, cekaman kekeringan, aplikasi ZnO-NP, dan interaksi keduanya tidak berpengaruh nyata terhadap kandungan prolin kedelai ($P > 0,05$). Secara deskriptif, kandungan prolin tertinggi terdapat pada perlakuan 50% kapasitas lapang sebesar $5,81 \pm 0,37 \mu\text{mol g}^{-1}$ dan pada aplikasi ZnO-NP 100 ppm sebesar $5,99 \pm 0,44 \mu\text{mol g}^{-1}$. Hasil ini menunjukkan bahwa tingkat cekaman yang diberikan belum cukup kuat untuk memicu peningkatan prolin secara signifikan, sehingga aplikasi ZnO-NP sintesis mimba pada konsentrasi yang digunakan belum mampu meningkatkan kandungan prolin kedelai secara nyata pada kondisi penelitian ini.

Kata kunci: *Azadirachta indica*, cekaman kekeringan, kedelai, prolin, ZnO-NP

APPLICATION OF NEEM (*Azadirachta indica*)-SYNTHESIZED ZINC OXIDE NANOFERTILIZER (ZnO-NP) ON PROLINE CONTENT OF SOYBEAN (*Glycine max* L.) UNDER DROUGHT STRESS

Nofal Aldi Husaini, Evika Sandi Savitri, Kivah Aha Putra

Department of Biology, Faculty of Science and Technology,
State Islamic University Maulana Malik Ibrahim Malang

ABSTRACT

Soybean (*Glycine max* L.) is an important food crop; however, its productivity is often reduced by drought stress. This study aimed to characterize zinc oxide nanoparticles (ZnO-NPs) synthesized using neem (*Azadirachta indica*) leaf extract and to evaluate the effects of drought stress and ZnO-NP application on the proline content of soybean plants. The experiment was arranged in a factorial Completely Randomized Design (CRD) with two factors: drought stress levels consisting of 100%, 75%, and 50% field capacity, and fertilization treatments consisting of a control, ZnO-NP 100 ppm, ZnO-NP 200 ppm, ZnO-NP 300 ppm, and ZnSO₄ 400 ppm. The synthesized nanoparticles were characterized using Particle Size Analysis (PSA) and Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). Proline content was measured spectrophotometrically at a wavelength of 520 nm, and the data were analyzed using two-way Analysis of Variance (ANOVA). The results showed that ZnO nanoparticles were successfully synthesized with an average particle size of 112.87 nm and a polydispersity index (PDI) of 0.201, indicating relatively homogeneous particles. However, drought stress, ZnO-NP application, and their interaction had no significant effect on soybean proline content ($P > 0.05$). Descriptively, the highest proline content was observed under 50% field capacity ($5,81 \pm 0,37 \text{ g}^{-1}$) and in the ZnO-NP 100 ppm treatment ($5,99 \pm 0,44 \text{ } \mu\text{mol g}^{-1}$). These findings suggest that the drought stress imposed in this study was not severe enough to induce significant proline accumulation. Therefore, neem-synthesized ZnO-NPs at the applied concentrations were not effective in significantly enhancing soybean proline content under the experimental conditions.

Keywords: *Azadirachta indica*, drought stress, *Glycine max*, green synthesis, plant biochemistry, ZnO-NPs

تأثير تطبيق سماد أكسيد الزنك النانوي (ZnO-NP) المحضّر باستخدام النيم (*Azadirachta indica*) في محتوى البرولين لدى فول الصويا (*Glycine max L*). تحت ظروف الإجهاد المائي

نوفل ألددي حسيني، إيفيكا سانددي سافيتري، كيفاه آها بوترا

قسم الدراسة العلم الأحياء، كلية العلوم والتكنولوجيا، جامعة مولانا مالك إبراهيم الإسلامية الحكومية مالانج

ملخص

يُعد فول الصويا (*Glycine max L*). من المحاصيل الغذائية المهمة، إلا أن إنتاجيته غالبًا ما تتأثر سلبيًا بالإجهاد المائي (الجفاف). هدفت هذه الدراسة إلى توصيف جسيمات أكسيد الزنك النانوية (ZnO-NPs) المحضّرة حيويًا باستخدام مستخلص أوراق النيم (*Azadirachta indica*)، وتقييم تأثير الإجهاد المائي وتطبيق هذه الجسيمات النانوية في محتوى البرولين لدى نبات فول الصويا. استُخدم تصميم عشوائي كامل (CRD) بنظام عاملي مكوّن من عاملين، هما مستويات الإجهاد المائي (100%، و75%، و50% من السعة الحقلية)، ومعاملات التسميد التي شملت: معاملة الشاهد، وZnO-NPs بتركيز 100 جزء في المليون، و200 جزء في المليون، و300 جزء في المليون، بالإضافة إلى $ZnSO_4$ بتركيز 400 جزء في المليون. تم توصيف الجسيمات النانوية باستخدام تحليل حجم الجسيمات (PSA) ومطيافية الأشعة تحت الحمراء بتحويل فورييه (FTIR)، بينما قُدِّر محتوى البرولين طيفيًا عند طول موجي 520 نانومتر، وُحللت البيانات باستخدام تحليل التباين الثنائي (Two-way ANOVA). أظهرت النتائج نجاح تخليق جسيمات أكسيد الزنك النانوية بمتوسط حجم بلغ 112.87 نانومتر ومعامل تشتت (PDI) قدره 0.201، مما يدل على تجانس نسبي للجسيمات. ومع ذلك، لم يكن للإجهاد المائي أو لتطبيق الجسيمات النانوية أو للتفاعل بينهما أي تأثير معنوي في محتوى البرولين لدى نباتات فول الصويا ($P < 0.05$). وصفيًا، سُجِّل أعلى محتوى من البرولين عند مستوى 50% من السعة الحقلية بمقدار 5.81 ± 0.37 ميكرومول غرام⁻¹، وعند معاملة ZnO-NPs بتركيز 100 جزء في المليون بمقدار 5.99 ± 0.44 ميكرومول غرام⁻¹. وتشير هذه النتائج إلى أن مستوى الإجهاد المائي المستخدم في هذه الدراسة لم يكن كافيًا لتحفيز تراكم البرولين بصورة معنوية، كما أن تطبيق جسيمات أكسيد الزنك النانوية المحضّرة من أوراق النيم بالتراكيز المستخدمة لم يكن قادرًا على زيادة محتوى البرولين في فول الصويا بشكل معنوي تحت ظروف هذه الدراسة.

الكلمات الرئيسية: فول الصويا، الإجهاد المائي، البرولين، جسيمات أكسيد الزنك النانوية (ZnO-NPs)، النيم (*Azadirachta indica*)، الجسيمات النانوية

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

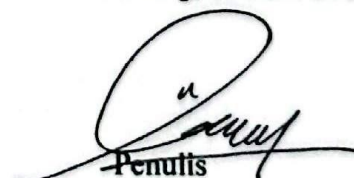
Puji syukur kepada Allah SWT yang telah menganugerahkan rahmat dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan proposal skripsi yang berjudul “Aplikasi *nano fertilizer* Zink (ZnO-NP) Sintesis mimba (*Azadirachta indica*) Terhadap Karakter Biokimiawi Kedelai (*Glycine max L.*) Pada Stres Kekeringan”. Tidak lupa shalawat dan salam disampaikan kepada junjungan Nabi besar Muhammad SAW. yang telah menegakkan agama Islam yang terpatri hingga akhir zaman. Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada seluruh pihak yang membantu menyelesaikan skripsi ini, terkhusus kepada:

1. Prof. Dr. Hj. Ilfi Nurdiana, M.Si., CHARM, CRMP selaku Rektor Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
2. Dr. Agus Mulyono, M. Kes selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
3. Prof. Dr. Retno Susilowati, M.Si selaku Ketua Program Studi Biologi, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
4. Prof. Dr. Evika Sandi Savitri, M.P. selaku dosen pembimbing skripsi yang telah banyak meluangkan waktu, tenaga, dan pikiran untuk memberikan bimbingan dengan penuh kesabaran.
5. Kivah Aha Putra, M.Pd selaku dosen pembimbing agama yang telah banyak memberikan bimbingan terkait integrasi sains dan islam.
6. Suyono, M.P, dan Didik Wahyudi, M.Si selaku penguji proposal skripsi dan skripsi yang telah memberikan banyak masukan.
7. Seluruh dosen dan laboran di Program Studi Biologi, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang yang setia menemani penulis dalam melakukan penelitian di laboratorium tersebut.

Semoga segala kebaikan yang diberikan oleh beberapa pihak tersebut kepada penulis mendapatkan balasan kebaikan dari Allah SWT. Penulis masih melakukan kesalahan dalam penyusunan skripsi ini, Oleh karena itu, penulis meminta maaf atas kesalahan yang dilakukan penulis dan berharap adanya kritik dan saran yang membangun sehingga skripsi ini dapat bermanfaat bagi pembaca dan dapat dijadikan referensi demi pengembangan ke arah yang lebih baik. Semoga Allah Swt. senantiasa melimpahkan rahmat dan ridha-Nya kepada kita semua. Aamiin.

Waalaikumsalam Warahmatullahi Wabarakatuh

Malang, 19 Juni 2026



Penulis

DAFTAR ISI

COVER	i
HALAMAN JUDUL	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
HALAMAN PERSEMBAHAN	iv
MOTTO.....	v
PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN.....	vi
PEDOMAN PENGGUNAAN SKRIPSI.....	vii
ABSTRAK.....	viii
ABSTRACT	ix
ملخص	x
KATA PENGANTAR.....	xi
DAFTAR ISI	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xiv
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR LAMPIRAN	xvi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	6
1.3 Tujuan.....	6
1.4 Manfaat.....	7
1.5 Batasan Masalah.....	7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	8
2.1 Botani Kedelai (<i>Glycine max</i> L.).....	8
2.1.1 Klasifikasi	8
2.1.2 Morfologi.....	8
2.2 Efek Stres Kekeringan pada tanaman dan peranan prolin dalam meminimalisimya.....	14
2.3 Peran Unsur Hara Zink (Zn) pada Kondisi Kekeringan	23
2.4 Aplikasi nanoteknologi dalam Pertanian	27
2.5 Sintesis Nanopartikel Berbasis Biologis (<i>Green Synthesized</i>).....	29
2.6 <i>Azadirachta indica</i> (mimba) sebagai Agen Biosintesis.....	32
BAB III METODE PENELITIAN	37

3.1 Rancangan Penelitian	37
3.2 Waktu dan Tempat Penelitian	38
3.3 Alat dan Bahan.....	39
3.3.1 Alat.....	39
3.3.2 Bahan.....	39
3.4 Prosedur Penelitian.....	40
3.4.1 Sintesis Nanopartikel zink ekstrak <i>Azadirachta indica</i>	40
3.4.2 Uji PSA.....	41
3.4.3 Uji FTIR (<i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i>)	41
3.4.4 Persiapan media & Penanaman kedelai	42
3.4.5 Aplikasi perlakuan.....	43
3.4.6 Uji Kandungan Prolin.....	43
3.5 Analysis Data	44
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	45
4.1 Karakteristik nanopartikel zink	45
4.2 Kandungan Prolin kedelai.....	48
BAB V PENUTUP.....	59
5.1 Kesimpulan.....	59
5.2 Saran.....	59
DAFTAR PUSTAKA.....	61
LAMPIRAN.....	68

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Morfologi kedelai:.....	9
Gambar 2.2 Struktur molekul L-Prolin.....	15
Gambar 2.3 Bagaimana proline melindungi protein.....	18
Gambar 2.4 Skema penyerapan pupuk nanopartikel.....	28
Gambar 2.5 Substansi biologis yang dapat dipakai Green Synthesized.....	30
Gambar 2.6 Skema mekanisme Green Synthesized nanopartikel logam.....	31
Gambar 2.7 Morfologi <i>Azadirachta indica</i>	33
Gambar 4.1 Distribusi ukuran partikel (PSA) nanopartikel ZnO (ZnO-NPs).....	45
Gambar 4.2 Perbandingan spektrum <i>Fourier Transform Infrared</i> (FTIR).....	47

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Peningkatan hasil panen kedelai setelah aplikasi pupuk zink.....	25
Tabel 3.1 Denah pengacakan.....	38
Tabel 4.1 Pengaruh cekaman kekeringan & aplikasi ZnO-NP sintesis mimba terhadap kandungan prolin tanaman kedelai.....	49

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Perhitungan $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ untuk sintesis nanopartikel.....	68
Lampiran 2 Hasil PSA.....	69
Lampiran 3 Hasil Uji FTIR	72
Lampiran 4 Perhitungan Taraf Zn nanopartikel.....	74
Lampiran 5 Perhitungan Penentuan Kapasitas Lapang Tanah.....	77
Lampiran 6 Perhitungan pupuk NPK.....	81
Lampiran 7 Perhitungan larutan untuk uji prolin.....	83
Lampiran 8 Hasil uji kandungan prolin.....	85
Lampiran 9 Dokumentasi penelitian	92
Lampiran 10 Bukti bimbingan.....	95
Lampiran 11 Bukti cek plagiasi	96

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Allah SWT pada hakikatnya telah menghidupkan berbagai makhluk dimuka bumi dengan berbagai macam sifat dan keanekaragamnya. Setiap makhluk tersebut memiliki peran dan manfaat yang juga berbeda-beda, baik bagi ekologis atau untuk manusia itu sendiri. Segala macam manfaat tersebut merupakan bukti nyata atas kekuasaan dan kebesaran-Nya, yang harus disyukuri dan dijaga, sebagaimana tercantum dalam firman Allah dalam Q.S. Yasin [36]: 33–35 sebagai berikut:

وَإِنَّهُمْ لَآلِئُ الْأَرْضِ الْمَيِّتَةِ لِخَيِّبِهَا وَآخَرَجْنَا مِنْهَا حَبًّا فَمِنْهُ يَأْكُلُونَ ۝ ٣٣ وَجَعَلْنَا فِيهَا جَنَّاتٍ مِنْ نَخِيلٍ وَأَعْنَابٍ وَفَجْرْنَا فِيهَا مِنَ الْعُيُونِ ۝ ٣٤ لِيَأْكُلُوا مِنْ ثَمَرِهِ ۝ وَمَا عَمِلَتْهُ أَيْدِيهِمْ ۖ أَفَلَا يَشْكُرُونَ ۝ ٣٥

Artinya: “(33) Suatu tanda (kekuasaan-Nya) bagi mereka adalah bumi yang mati (tandus lalu) Kami menghidupkannya dan mengeluarkan darinya biji-bijian kemudian dari (biji-bijian) itu mereka makan. (34) Kami (juga) menjadikan padanya (bumi) kebun-kebun kurma dan anggur serta Kami memancarkan padanya beberapa mata air (35) agar mereka dapat makan dari buahnya, dan dari hasil usaha tangan mereka. Mengapa mereka tidak bersyukur?.”

Menurut Ibnu Katsir, ayat ini menggambarkan kekuasaan Allah dalam menghidupkan bumi yang tandus menjadi subur kembali melalui air hujan. Dari bumi yang semula mati, Allah menumbuhkan biji-bijian dan tanaman yang menjadi sumber makanan bagi manusia. Hal ini menjadi tanda kebesaran Allah yang menunjukkan bahwa seluruh proses kehidupan, termasuk pertumbuhan tanaman dan keseimbangan ekosistem, berada dalam kendali-Nya (Katsir 2008). Dalam Tafsir Al-Misbah, Quraish Shihab menekankan bahwa ayat ini mengandung peringatan agar manusia tidak hanya menikmati hasil bumi, tetapi juga bersyukur dengan cara memeliharanya dan mengelolanya dengan baik. Rasa syukur tersebut dapat diwujudkan melalui pengkajian dan inovasi yang bertujuan menjaga

kelestarian lingkungan serta meningkatkan kesejahteraan manusia (Shihab 2002). Dari makna ayat tersebut, manusia dituntut untuk berinovasi dalam menjaga keberlangsungan kehidupan di bumi, termasuk dalam bidang pertanian. Salah satu tanaman pangan penting yang menjadi perhatian adalah kedelai (*Glycine max* L.), karena kandungan protein nabatinya yang tinggi dan perannya sebagai sumber gizi utama, khususnya di Indonesia (Kementerian Pertanian Republik Indonesia, 2024).

Kedelai merupakan tanaman pangan yang kaya akan protein dan lemak nabati sehingga menjadi salah satu komoditas pangan yang strategis. Di Indonesia, kedelai telah dimanfaatkan sebagai bahan baku berbagai produk olahan seperti tempe, tauco, dan susu kedelai. Selain itu, limbah hasil pengolahannya juga dapat dimanfaatkan sebagai pakan ternak. Namun demikian, produksi kedelai nasional pada tahun 2024 hanya mencapai 201.917 ton, sedangkan kebutuhan kedelai nasional mencapai 2,58 juta ton. Kondisi tersebut menyebabkan sebagian besar kebutuhan kedelai dalam negeri masih dipenuhi melalui impor, yaitu sekitar 2,7 juta ton (Kementerian Pertanian Republik Indonesia, 2024). Data tersebut menunjukkan bahwa produksi kedelai nasional belum mampu memenuhi kebutuhan dalam negeri. Rendahnya produksi kedelai dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor, antara lain teknik budidaya yang belum optimal, penggunaan varietas yang kurang sesuai, serta kondisi kesuburan tanah yang kurang mendukung pertumbuhan tanaman (Garuda dkk., 2017; Gulo & Nurhayati, 2023).

Kesuburan tanah selain dipengaruhi oleh mikroba dan unsur hara yang terkandung, juga dipengaruhi oleh ketersediaan air dalam tanah (Semenova *et al.*, 2024). Apabila media tanah memiliki kadar air yang sangat rendah atau tanaman mengalami stres kekeringan, hal tersebut akan menyebabkan kemampuan akar

untuk menyerap nutrisi menurun, sehingga dapat menurunkan pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Lebih lanjut, pada kondisi stres kekeringan, stomata akan menutup, akibatnya pasokan CO² berkurang yang mengakibatkan produksi Spesies oksigen reaktif (ROS). Akumulasi ROS lebih lanjut dapat merusak membran sel dan molekul molekul penting seperti protein dan lipid yang berperan pada proses pertumbuhan dan perkembangan tanaman (Hassan *et al.*, 2020) yang pada akhirnya menyebabkan penurunan panen tanaman kedelai, baik dari segi kuantitas dan kualitas (Krisnawati & Adie, 2017).

Untuk meminimalisir efek stres kekeringan, tanaman beradaptasi dengan berbagai macam cara, mulai dari menurunkan kadar klorofilnya agar penggunaan air lebih efisien, sintesis enzim enzim antioksidan (Qiao *et al.*, 2024), serta memproduksi senyawa osmolit seperti prolin yang membantu menjaga stabilitas membran sel, penyesuaian osmotik dan menurunkan akumulasi ROS. Kandungan prolin sendiri diketahui sering dipakai acuan untuk mengetahui tingkat ketahanan tanaman dalam kondisi stres kekeringan. Akan tetapi, tanaman memiliki toleransi kekeringan yang berbeda beda (Du *et al.*, 2020). Mengingat kedelai merupakan tanaman yang paling rentan terhadap stres kekeringan, dibandingkan tanaman kacang-kacangan lainnya, perlakuan tambahan perlu dilakukan untuk meminimalisir efek stres tersebut (Gulo & Nurhayati, 2023).

Stres kekeringan dapat diminimalisir dengan pembuatan irigasi yang baik, pemilihan varietas yang tahan stres kekeringan dan aplikasi pemupukan yang sesuai (Shirvani-Naghani-Naghani *et al.*, 2024). Pemupukan yang sesuai seperti aplikasi pupuk mikronutrien zink merupakan solusi untuk meminimalisir efek stres kekeringan dan dapat meningkatkan produktivitas tanaman, sehingga pengaplikasian

zink memiliki manfaat lebih (Hassan, *et al.*, 2020). Zink merupakan salah satu unsur logam yang penting dalam perkembangan tanaman. Peranannya sebagai kofaktor berbagai enzim berpengaruh pada aktivitas enzim pada metabolisme tanaman seperti enzim antioksidan yang dapat menurunkan kadar ROS. Selain itu, zink juga berperan dalam akumulasi prolin, sintesis klorofil, penyerapan nutrisi, serta peningkatan kualitas dan kuantitas hasil panen tanaman. Maka dari itu, pengaplikasian zink diharapkan dapat meningkatkan daya tahan tanaman pada kondisi stress kekeringan (Hassan *et al.*, 2020).

Pengaplikasian atau pemupukan zink dapat dilakukan dengan pemberian secara langsung atau dalam bentuk nanopartikel. Akan tetapi, pemberian secara langsung (konvensional) tidak efisien dan dapat mencemari tanah (Semenova *et al.* 2024), alternatifnya pupuk nanopartikel memiliki beberapa kelebihan, diantaranya memiliki ukuran berbentuk nano sehingga mudah dan cepat diserap. Lebih lanjut aplikasi nanopartikel dapat dilakukan dengan menyemprotkan langsung di daun, sehingga dapat mengefisiensi jumlah pupuk yang diaplikasikan, karena dapat langsung menembus dinding sel atau lewat stomata (Balusamy *et al.*, 2023) dan meminimalisir efek toksisitas tanah (Semenova *et al.*, 2024). Maka dari itu, berdasarkan keunggulan pupuk nanopartikel, Penting untuk melakukan perbandingan lebih lanjut terkait keefektifan yang dihasilkannya.

Penelitian-penelitian terdahulu telah mencoba untuk menguji keefektifan pupuk nanopartikel. Dola & Mannan (2022) mengungkapkan bahwa pemberian *Zink Oxide Nanoparticles* (ZnO-NPs) sebanyak 200 ppm pada kedelai yang mengalami kekeringan, dapat meningkatkan hasil panen kedelai. Shirvani-Naghani *et al.* (2024) juga mengkonfirmasi hal yang sama, dengan pemberian ZnO-NP

sebanyak 200 mg Zn/L pada kedelai (*Glycine max*) yang mengalami stres kekeringan, terbukti lebih efektif jika dibandingkan dengan pemberian zink sulfate (ZnSO_4) dengan konsentrasi 400 mg Zn/L yang merepresentasikan pupuk konvensional. Semida *et al.* (2021) juga mengungkapkan bahwa aplikasi nanopartikel ZnO pada daun terong (*Solanum melongena*) mampu meningkatkan pertumbuhan tanaman yang mengalami kekeringan, serta memiliki hasil yang sama atau lebih tinggi dari pada tanaman yang telah diberikan air secara cukup.

Aplikasi pupuk nanopartikel telah terbukti meningkatkan produktivitas kedelai (Dola & Mannan 2022 dan Shirvani-Naghani *et al.*, 2024), namun nanopartikel zink yang digunakan masih menggunakan metode sintesis fisikokimia. Disisi lain, beberapa metode fisikokimia seperti presipitasi, kompleks polimer Pechini, pembakaran, sol-gel, hidrotermal, dan mekanokimia cenderung berpotensi mencemari lingkungan (Tănase *et al.* 2021; Benitez-Salazar *et al.* 2021). Oleh karena itu diperlukan metode sintesis nanopartikel zink yang lebih ramah lingkungan.

Alternatif yang dapat digunakan untuk mengganti sintesis nanopartikel secara fisikokimia adalah menggunakan metode *green synthesized* (Tănase *et al.* 2021; Benitez-Salazar *et al.* 2021). Metode green synthesis merupakan metode sintesis nanopartikel yang memanfaatkan senyawa bioaktif dari bahan organik sebagai agen pereduksi dan penstabil, sehingga lebih ekonomis, ramah lingkungan, dan minim risiko terhadap kesehatan. Daun mimba (*Azadirachta indica*) diketahui memiliki senyawa bioaktif yang tinggi (Sarkar *et al.* 2021) sehingga berpotensi untuk sintesis nanopartikel. Hal tersebut dikonfirmasi oleh Bhuyan *et al.* (2015) dan

Sanjeev *et al.* (2023) bahwa daun mimba dapat mensintesis ZnO NPs dengan ukuran 9,6–25,5 nm dan 10 – 50 nm.

Berdasarkan potensi daun mimba sebagai agen sintesis ZnO-NP tersebut, serta potensinya dalam meminimalisir dampak stres kekeringan melalui regulasi kimia yang dihasilkan, maka penting untuk mengkaji hasil aplikasi *nano fertilizer* dengan sintesis mimba pada tumbuhan kedelai yang mengalami stress kekeringan terhadap kandungan prolin sebagai parameter dalam meningkatkan ketahanan tanaman kedelai dalam kondisi stres kekeringan.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah

1. Bagaimana karakter *nano fertilizer* zink dengan bioreduktor *A. indica*
2. Apakah ada pengaruh stres kekeringan terhadap kandungan prolin tanaman kedelai (*Glycine max* L.)
3. Apakah ada pengaruh aplikasi *nano fertilizer* zink (ZnO-NP) sintesis mimba (*Azadirachta indica*) pada kandungan prolin kedelai (*Glycine max* L.)
4. Apakah ada pengaruh kombinasi antara stres kekeringan dan aplikasi nanopartikel pada kandungan prolin

1.3 Tujuan

Tujuan penelitian ini adalah

1. Untuk mensintesis senyawa nano fertilizer zink dengan bioreduktor *A. indica*
2. Untuk menganalisis pengaruh stres kekeringan terhadap kandungan prolin tanaman kedelai (*Glycine max* L.)
3. Untuk menganalisis pengaruh aplikasi *nano fertilizer* zink (ZnO-NP) sintesis mimba (*Azadirachta indica*) terhadap kandungan prolin kedelai (*Glycine max* L.) pada kondisi stres kekeringan.
4. Untuk menganalisis pengaruh kombinasi antara stres kekeringan dan aplikasi nanopartikel pada kandungan prolin

1.4 Manfaat

Penelitian ini diharapkan dapat menjadi menjadi acuan penggunaan pupuk ZnO-NP sintesis mimba (*Azadirachta indica*) untuk mengantisipasi dampak stres kekeringan pada tumbuhan kedelai. Dengan pemanfaatan metode *Green Synthesized* untuk menghasilkan pupuk nanopartikel, penelitian ini juga berkontribusi pada pertanian berkelanjutan yang lebih ramah lingkungan.

1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Karakterisasi nanopartikel dibatasi pada rata rata kumulatif, Homogenitas (PDI) dan gugus kimia yang terbentuk.
2. Variabel yang diamati dibatasi pada kandungan prolin ($\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$)

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Botani Kedelai (*Glycine max* L.)

2.1.1 Klasifikasi

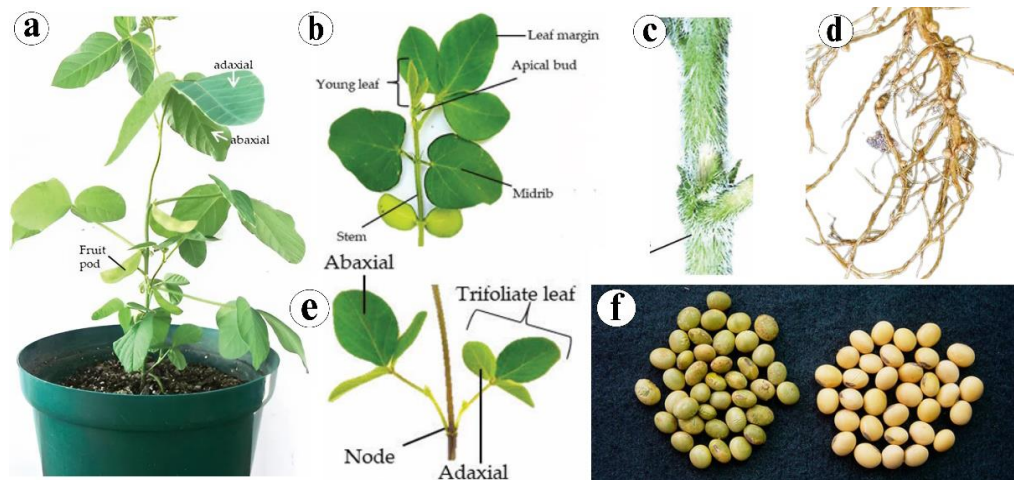
Kedelai dengan nama latin *Glycine max* L. merupakan tumbuhan semak yang termasuk dalam keluarga fabaceae. Posisi taxon kedelai lebih lanjut dapat dilihat pada sistematika dibawah ini (Singh *et al.*, 2006):

Kingdom	: Plantae
Division	: Magnoliophyta (flowering plants)
Class	: Magnoliopsida (dicotyledons)
Order	: Fabales
Family	: Fabaceae (Legume / pea family)
Genus	: Glycine
Species	: <i>Glycine max</i> (L.) Merr.

2.1.2 Morfologi

Kedelai termasuk tanaman berbentuk semak dengan tinggi 10-200 cm, yang tersusun dari organ vegetatif dan generatif (Gambar 2.1a). Organ vegetatif kedelai terdiri dari akar, batang dan daun, sedangkan organ generatif meliputi bunga, buah (polong) dan biji (Sy & Djauhari, 2012). Kedelai memiliki tipe perakaran tunggang dan akar serabut (Gambar 2.1d). Panjang akar kedelai berkisar antara 20-50 cm tergantung kondisi tanah (Sy & Djauhari, 2012). Selain itu pada akar kedelai terdapat bintil akar yang di dalamnya terdapat mikroba pengikat nitrogen, yakni bakteri *R. japonicum* yang membantu kedelai untuk menyerap nitrogen, sehingga

penyerapan nitrogen tanaman kedelai lebih baik daripada tanaman lainnya (Muliani dkk., 2025).



Gambar 2.1 Morfologi kedelai: (a) Tumbuhan kedelai (Mangena, 2018), (b) daun kedelai (Mangena, 2018), (c) trikoma pada batang kedelai (Mangena, 2018), (d) akar kedelai (Sible & Below 2023), (e) percabangan kedelai (Mangena 2018), (f) biji kedelai berwarna hijau (stres kekeringan) & biji berwarna kuning (normal) (Lemes & Catão, 2024).

Batang kedelai berbuku buku antara 15-20 buah dan memiliki cabang yang sedikit atau banyak tergantung kultivar dan lingkungan hidupnya (Gambar 2.1e). (Sy & Djauhari, 2012), akan tetapi umumnya memiliki 1-5 cabang (Susanti & Kalsum, 2020). Daun kedelai termasuk daun majemuk dengan 3 helai anak daun (trifoliate) yang berbentuk oval dan memiliki warna hijau (Gambar 2.1b). Batang kedelai berwarna hijau atau sedikit keunguan dan memiliki rambut epidermal di permukaan batangnya, dimana rambut epidermal tersebut juga dapat ditemukan di permukaan daun dan polong, selain itu ujung batang kedelai dapat tumbuh melilit (indeterminate) sehingga ujung batang tidak berakhir dengan rangkaian bunga atau tumbuh tegak (determinate), yaitu batang berakhir dengan rangkaian bunga dan

ujung batang tegak ke atas tanpa tumbuh melilit (Gambar 2.1c) (Sy & Djauhari, 2012)

Bunga kedelai tumbuh pada ketiak daun dengan jumlah 2-15 kuntum bunga, selain itu bunga kedelai memiliki 2 mahkota dan 2 kelopak bunga dengan warna putih atau ungu muda dan termasuk bunga sempurna yang memiliki 10 benang sari dan satu putik. Dari banyaknya kuntum bunga yang tumbuh di ketiak daun, pada akhirnya sebagian besar akan rontok dan hanya sebagian yang akan berkembang membentuk polong kedelai, selain itu jumlah polong kedelai yang terbentuk tergantung kultivar kedelai itu sendiri, ada kultivar yang memiliki polong sedikit dan ada kultivar yang membentuk kultivar yang cukup banyak. Berat biji yang terdapat dalam polong juga berbeda beda dengan kisaran 50-500 gram per 1000 butir biji, Selain itu biji kedelai juga memiliki warna yang berbeda beda, ada yang berwarna kuning, hijau transparan dan sampai gelap kecoklatan (Gambar 2.1f) (Sy & Djauhari, 2012).

Biji kedelai memiliki nutrisi yang tinggi karena rata-rata berat kering bijinya mengandung 40–41% protein, 8,1–24,0% lemak, dan 35% karbohidrat yang berkhasiat untuk kesehatan manusia. Berbagai makronutrien tersebut menyimpan senyawa spesifik dengan efek terapeutik yang beragam bagi tubuh (Medic *et al.*, 2014). Komponen protein pada kedelai meliputi protein cadangan, inhibitor tripsin, dan lektin yang berfungsi sebagai antikanker serta penurun kolesterol. Pada komponen lipid, terdapat asam lemak esensial (linoleat dan alfa-linolenat) untuk kesehatan jantung dan kardiovaskular; tokoferol dan fitosterol sebagai antioksidan sekaligus penurun kolesterol; serta fosfolipid dan sfingolipid untuk mendukung

fungsi otak, kesehatan hati, dan sistem imun. Terakhir, komponen karbohidrat kedelai didominasi oleh serat makanan yang sangat berkhasiat dalam melancarkan pencernaan, mencegah kanker usus, dan berfungsi sebagai antihipertensi (Medic *et al.*, 2014). Dengan demikian kedelai memiliki manfaat yang besar untuk kesehatan manusia.

Di Indonesia kedelai menjadi pangan utama setelah padi dan jagung karena merupakan sumber protein sebagian besar warga Indonesia. Kedelai merupakan bahan dasar dari berbagai macam olahan lokal seperti tempe, tahu, oncom dan susu kedelai. Akan tetapi produksi kedelai Indonesia hanya sebesar 201.917 ton (6,84 Persen) sedangkan kebutuhan kedelai 2024 sebesar 2,58 juta ton pada tahun 2024, yang mana sekitar 2,7 juta ton (91,56 Persen) kedelai dipasok oleh impor, dengan hanya sebesar 2.707 ton (0,09 Persen) kedelai yang dapat diekspor (Kementerian Pertanian Republik Indonesia, 2024), data tersebut menunjukkan keterbatasan produksi kedelai lokal Indonesia. Menurut Gulo & Nurhayati (2023), salah satu penyebab Rendahnya produktivitas kedelai lokal adalah karena sistem penanaman kedelai umumnya ditanami pada lahan sawah di musim kemarau, sedangkan di musim hujan di lahan kering, hal ini menyebabkan ketidaksesuaian ketersediaan air untuk tanaman kedelai, seperti kondisi stres kekeringan. Mengingat kedelai merupakan tanaman yang lebih rentan mengalami stres kekeringan dari pada tanaman kacang-kacangan lainya, kondisi ini akan sangat mempengaruhi pertumbuhan dan hasil panen kedelai.

Kedelai memiliki Toleransi kekeringan yang berbeda-beda untuk setiap fase Tumbuhnya. Penelitian We *et al.* (2018) menunjukkan pada kapasitas lapang 35-

55% pada fase perkecambahan, memiliki dampak yang ringan pada pertumbuhan kedelai dan hasil panen, sedangkan kekeringan pada fase vegetatif memiliki dampak yang sedang, akan tetapi kekeringan pada fase generatif (pembungaan dan pembentukan polong) memiliki dampak yang tinggi terhadap pertumbuhan dan hasil panen kedelai. Sehingga perawatan yang sesuai diperlukan untuk menjaga produktivitas kedelai.

Islam memandang segala bentuk aktivitas yang berkaitan dengan pengelolaan alam, seperti menanam dan merawat tumbuhan, sebagai bagian dari amal saleh yang bernilai ibadah apabila diniatkan untuk kemaslahatan makhluk. Hal ini ditegaskan dalam sabda Rasulullah ﷺ yang mengangkat keutamaan menanam dan memelihara tanaman sebagai amal yang berpahala sebagai berikut:

عَنْ أَنَسِ بْنِ مَالِكٍ رَضِيَ اللَّهُ عَنْهُ، قَالَ: قَالَ رَسُولُ اللَّهِ ﷺ: مَا مِنْ مُسْلِمٍ يَغْرِسُ غَرْسًا أَوْ يَزْرَعُ زَرْعًا، فَيَأْكُلُ مِنْهُ طَيْرٌ، أَوْ إِنْسَانٌ، أَوْ بَهِيمَةٌ، إِلَّا كَانَ لَهُ بِهِ صَدَقَةٌ (أَخْرَجَهُ الْبُخَارِيُّ فِي: (٤١) كِتَابُ الْمَزَارَعَةِ، (١) بَابُ فَضْلِ الزَّرْعِ وَالْغَرْسِ إِذَا أَكَلَ مِنْهُ، رَقْمُ ٢٣٢٠ (وَمُسْلِمٌ رَقْمُ ١٥٥٣)

Artinya: “Tidaklah seorang muslim menanam suatu tanaman atau menabur benih, kemudian dari tanaman itu dimakan oleh burung, manusia, atau binatang, kecuali baginya menjadi sedekah.” (Diriwayatkan oleh Al-Bukhari pada kitab ke-41 Kitab Muzara'ah. Bab *Fadhl al-Ghars wa al-Zar'*, No. 2320; Muslim No. 1553).

Imam An-Nawawi dalam *Syarh Shahih Muslim* (juz 10, hal. 164–165) menjelaskan bahwa hadits ini menunjukkan tentang segala bentuk usaha bercocok tanam dan menanam pohon termasuk amal saleh yang pahalanya tidak terputus. Pahala itu berlaku meskipun sebagian hasilnya dimakan oleh hewan atau diambil tanpa izin, selama hal itu memberikan manfaat bagi makhluk hidup. Beliau menegaskan bahwa aktivitas menanam termasuk amal saleh yang pahalanya

berkelanjutan, bahkan jika hasilnya dimakan tanpa izin penanamnya, selama membawa manfaat bagi makhluk hidup. Aktivitas ini termasuk *sedekah jariyah* karena manfaatnya terus berlangsung selama tanaman hidup. Hadis ini menunjukkan keutamaan menanam dan bercocok tanam, serta bahwa pahala bagi orang yang menanam terus mengalir selama tanaman tersebut memberi manfaat, baik hasilnya dimakan manusia, hewan, atau burung.

Ibnu Hajar al-‘Asqalani dalam *Fath al-Bari Syarh Shahih al-Bukhari* (Juz 5, hlm. 5–6) memperluas makna hadis ini bahwa pahala tidak hanya berlaku untuk tanaman pangan, tetapi juga untuk segala jenis tumbuhan yang memberi manfaat, baik berupa naungan, oksigen, maupun pemandangan yang menyenangkan. Islam menghargai setiap upaya manusia dalam memakmurkan bumi dan menjaga keseimbangan ekosistem. Selain itu, *Syarh Riyâdhush Shâlihîn* karya Musthafa Dibal-Bugha dan Muhammad al-Syarif (Jilid 1, hlm. 342–343) menafsirkan bahwa hadits ini menunjukkan betapa besar nilai sosial dan ekologis dari aktivitas pertanian. Setiap manfaat sekecil apapun yang dihasilkan tanaman tetap tercatat sebagai pahala sedekah bagi penanamnya. Penulis menegaskan bahwa Islam sangat mendorong pengelolaan sumber daya alam yang berkelanjutan.

Hadis ini memberikan fondasi spiritual bagi kegiatan ilmiah di bidang pertanian. Upaya menanam, merawat, dan meneliti tanaman seperti kedelai bukan hanya kegiatan ilmiah atau ekonomi semata, tetapi juga bagian dari ibadah sosial yang berpahala. Melalui aktivitas pertanian, manusia berperan dalam menjaga keberlangsungan hidup makhluk lain dan menjalankan tanggung jawabnya sebagai khalifah di bumi. Upaya pembudidayaan tanaman kedelai yang berkelanjutan dan

bermanfaat luas merupakan bentuk nyata dari sedekah dan rasa syukur kepada Allah SWT atas karunia-Nya berupa keberagaman tumbuhan yang memberi manfaat bagi seluruh makhluk

2.2 Efek Stres Kekeringan pada tanaman dan peranan prolin dalam meminimalisirnya

Stres kekeringan merupakan faktor abiotik yang sering dihadapi oleh tanaman, sehingga menurunkan produktivitas dan hasil panen tanaman global sebanyak 60%. Kekeringan sendiri berasal dari kurangnya curah hujan atau kurangnya cadangan air dalam tanah yang signifikan. Saat cadangan air dalam tanah berkurang, suplai air dalam tanaman akan berkurang, sehingga cadangan air dalam sel tanaman juga akan berkurang (Bashir *et al.*, 2021). Pada kondisi defisit air tersebut tanaman akan memberikan respon dari akar ke daun untuk memproduksi hormon asam absisat (ABA), hormon ini akan menginduksi menutup stomatanya untuk mengurangi laju kehilangan air lewat transpirasi (Takahashi *et al.*, 2020), Akibatnya kapasitas CO_2 untuk masuk menurun, yang pada akhirnya produksi energi menurun dan pertumbuhan tanaman terganggu karena kurangnya suplai energi (Bashir *et al.*, 2021).

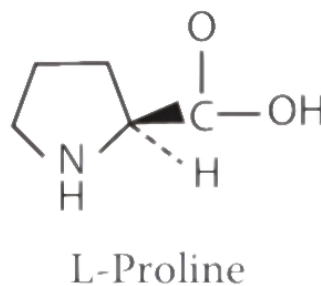
Lebih lanjut saat kurangnya CO_2 dalam sel, elektron yang dihasilkan saat reaksi terang pada tahap fotosintesis akan berikatan dengan Oksigen (O_2) akibat kurangnya CO_2 dalam sel, khususnya di kloroplas, sehingga membentuk oksigen yang lebih reaktif atau biasa dikenal reaktif oksigen spesies (ROS) seperti radikal anion superoksida (O_2^-), hidrogen peroksida (H_2O_2), dan radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$). Karena sifat ROS yang sangat reaktif, akumulasi ROS pada tanaman dapat

menyebabkan kerusakan oksidatif, sehingga menyebabkan degradasi protein, oksidasi lipid, dan pemudaran pigmen (Nikolaeva *et al.*, 2010). Dampak oksidatif tersebut juga diperparah dengan menurunnya pasokan nitrogen tanaman, sehingga protein yang berperan dalam metabolisme juga menurun (Du *et al.*, 2020). Untuk meminimalisir dampak dari stress kekeringan, tanaman mengaktifkan berbagai mekanisme adaptasi, baik secara fisiologis, biokimia, maupun molekuler.

Salah satu bentuk adaptasi penting adalah akumulasi senyawa osmoprotektan, yang berperan dalam menjaga keseimbangan osmosis sel dan stabilitas struktur seluler. Osmoprotektan diklasifikasikan menjadi tiga kelompok utama: senyawa yang mengandung *quaternary ammonium compounds* (contohnya betain dan turunannya), senyawa asam amino dan turunannya (contohnya prolin dan ektoin), serta gula dan turunannya (contohnya oligosakarida, fruktan, dan alkohol gula) (Hossain *et. al.*, 2019). Osmoprotektan meskipun memiliki berbagai macam jenisnya, asam amino prolin lebih sering dipilih sebagai parameter osmoprotektan karena sifat kimia prolin yang unik dan akumulasinya yang lebih cepat serta melimpah ketika diamati dalam kondisi stres pada banyak spesies tumbuhan jika dibandingkan dengan jenis osmolit lainya (Renzetti *et al.*, 2025). Lebih lanjut diketahui bahwa akumulasi prolin adalah yang paling luas di antara spesies tumbuhan, serta pada berbagai organisme seperti protozoa, eubakteria, invertebrata laut, dan alga (Renzetti *et al.*, 2025).

Prolin merupakan salah satu asam amino yang memiliki karakteristik unik dibandingkan asam amino lainnya, karena strukturnya berbentuk siklik yang terbentuk dari ikatan antara gugus amino dan rantai karbonnya (Gambar 2.2).

Struktur ini menjadikan prolin berperan penting dalam menentukan stabilitas dan pelipatan protein, sehingga keberadaannya tidak hanya terbatas sebagai penyusun protein, tetapi juga memiliki fungsi fisiologis yang kompleks, terutama dalam kondisi cekaman.



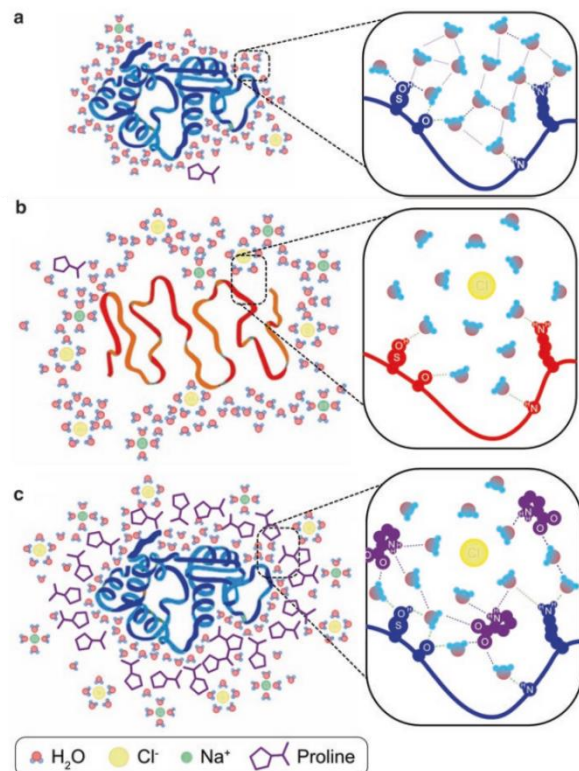
Gambar 2.2 Struktur molekul L-Prolin (Heuer., 2010)

Dalam sel tanaman, prolin berada dalam kondisi homeostasis yang dikendalikan oleh keseimbangan antara biosintesis, degradasi, serta distribusinya antar organel. Namun, ketika tanaman mengalami cekaman lingkungan seperti kekeringan, salinitas, atau suhu ekstrem, keseimbangan ini berubah secara signifikan, ditandai dengan meningkatnya akumulasi prolin bebas di dalam sel. Peningkatan ini terutama disebabkan oleh aktivasi jalur biosintesis dari glutamat yang dikatalisis oleh enzim kunci seperti P5CS, yang diketahui sangat responsif terhadap kondisi stres (Hossain *et. al.*, 2019).

Akumulasi prolin dalam kondisi cekaman sejak lama dihubungkan dengan fungsi sebagai osmolit, yaitu senyawa yang berperan dalam menjaga keseimbangan tekanan osmotik sel. Dalam kondisi kekeringan, penurunan potensial air di lingkungan menyebabkan air cenderung keluar dari sel, sehingga sel berisiko kehilangan tekanan turgor dan mengalami plasmolisis. Dalam konteks ini, prolin

berkontribusi dalam menurunkan potensial osmotik internal sel sehingga membantu mempertahankan air di dalam sel. Meskipun demikian, kajian kuantitatif menunjukkan bahwa kontribusi prolin terhadap penyesuaian osmotik secara keseluruhan relatif terbatas. Konsentrasi prolin yang terakumulasi pada sebagian besar kasus tidak cukup tinggi untuk sepenuhnya mengimbangi tekanan osmotik eksternal, bahkan kontribusinya sering kali hanya sebagian kecil dari total kebutuhan penyesuaian osmotik sel. Hal ini menunjukkan bahwa fungsi utama prolin dalam toleransi stres tidak hanya bergantung pada perannya sebagai osmolit (Hossain *et. al.*, 2019).

Peran yang lebih signifikan dari prolin justru terletak pada kemampuannya dalam menstabilkan struktur protein dan membran sel. Pada kondisi cekaman kekeringan, berkurangnya kandungan air dalam sel dapat mengganggu interaksi molekul air dengan protein, yang berujung pada perubahan konformasi dan bahkan denaturasi protein. Prolin berperan sebagai agen kosmotropik yang membantu mempertahankan lapisan hidrasi di sekitar protein, sehingga struktur tiga dimensi dan aktivitas enzim tetap terjaga (Gambar 2.3). Selain itu, prolin juga memiliki kemampuan untuk berinteraksi dengan komponen membran, khususnya fosfolipid, sehingga membantu menjaga integritas membran sel dalam kondisi stres. Stabilitas membran ini sangat penting karena kerusakan membran merupakan salah satu dampak utama dari cekaman kekeringan yang dapat menyebabkan kebocoran ion dan metabolit penting (Hossain *et. al.*, 2019).



Gambar 2.3 Mekanisme yang diusulkan Hossain et. al. (2019) Bagaimana proline melindungi protein. a. (Kondisi Normal): Protein aktif dan terlipat sempurna karena dikelilingi lapisan molekul air (H₂O) yang membentuk ikatan hidrogen stabil. b. (Gangguan Garam/ stres abiotik): Konsentrasi garam (Na⁺ dan Cl⁻) yang tinggi merusak lapisan air tersebut. Akibatnya, protein kehilangan bentuk (denaturasi) dan menjadi tidak aktif. c. (Perlindungan Prolin): Prolin berfungsi sebagai pelindung yang menstabilkan kembali lapisan air di sekitar protein. Hal ini menjaga protein tetap terlipat dan aktif meskipun di lingkungan yang ekstrem.

Di sisi lain, cekaman kekeringan umumnya diikuti dengan peningkatan produksi spesies oksigen reaktif (ROS) yang dapat menyebabkan kerusakan oksidatif pada lipid, protein, dan DNA. Dalam hal ini, prolin awalnya diasumsikan berperan sebagai antioksidan langsung yang mampu menetralkan ROS. Namun, bukti eksperimental menunjukkan bahwa kemampuan prolin dalam menetralkan berbagai jenis ROS secara langsung masih terbatas dan tidak selalu konsisten. Peran prolin dalam menghadapi stres oksidatif lebih banyak bersifat tidak langsung, yaitu

melalui kemampuannya dalam melindungi enzim-enzim antioksidan dari denaturasi serta memodulasi sistem pertahanan antioksidan tanaman. Selain itu, metabolisme prolin sendiri dapat berkontribusi dalam pembentukan ROS dalam jumlah terkendali yang berfungsi sebagai sinyal untuk mengaktifkan respons pertahanan tanaman, sehingga menunjukkan bahwa hubungan antara prolin dan ROS dapat berlawanan (Hossain *et. al.*, 2019).

Lebih lanjut, prolin juga memiliki peran penting dalam menjaga keseimbangan redoks sel. Proses biosintesis prolin dari glutamat membutuhkan konsumsi daya reduksi dalam bentuk NADPH, sedangkan degradasinya di mitokondria menghasilkan NADH dan FADH₂ yang dapat digunakan dalam rantai transpor elektron untuk menghasilkan energi. Dengan demikian, metabolisme protein berperan sebagai sistem pengatur aliran elektron dalam sel, yang sangat penting dalam kondisi cekaman untuk mencegah akumulasi kelebihan elektron yang dapat memicu pembentukan ROS secara berlebihan. Mekanisme ini juga menunjukkan bahwa prolin tidak hanya berperan dalam perlindungan sel, tetapi juga dalam pengaturan metabolisme energi dan keseimbangan fisiologis secara keseluruhan (Hossain *et. al.*, 2019).

Selain berperan selama fase cekaman, prolin juga memiliki fungsi penting pada fase pemulihan setelah stres berakhir. Prolin yang terakumulasi selama cekaman dapat dikatabolisme kembali menjadi glutamat dan selanjutnya masuk ke dalam siklus metabolisme energi, menghasilkan ATP dalam jumlah yang signifikan. Oleh karena itu, prolin dapat dianggap sebagai cadangan energi dan nitrogen yang sangat penting bagi tanaman untuk mendukung pertumbuhan

kembali setelah kondisi lingkungan kembali normal. Fungsi ini memperlihatkan bahwa akumulasi prolin bukan hanya merupakan respons pasif terhadap stres, tetapi juga merupakan strategi adaptif yang terintegrasi untuk memastikan kelangsungan hidup dan pemuliaan tanaman (Hossain *et. al.*, 2019).

Akumulasi prolin sebagai langkah adaptasi tanaman juga telah dikonfirmasi oleh berbagai penelitian terdahulu. Dalam penelitian Fukutok & Yamada (1981), kedelai yang mengalami kekeringan selama 10 hari dan berdasarkan potensial kadar air daun menunjukkan seiring menurunnya potensial kadar air tersebut, kandungan prolin semakin tinggi serta mencapai 130% peningkatan protein dari tanaman kontrol di kondisi potensial daun 2.6 Mpa. Mohammadkhani & Heidari (2008) juga menunjukkan bahwa kandungan prolin pada daun *Zea mays* L. 1,56–3,13 kali lebih tinggi daripada pada daun kontrol di bawah kondisi dehidrasi. Dalam percobaan lain, paparan defisit air selama 56 hari menghasilkan peningkatan 2,4 kali lipat pada kadar prolin pucuk pohon ek yang mengalami stres kekeringan dibandingkan dengan pucuk kontrol (Oufir *et al.* 2009). Wang *et.al* (2022) juga menunjukkan kandungan prolin daun kedelai meningkat seiring dengan penurunan kelembaban tanah. Pada penelitian Shirvani-Naghani-Naghani *et al.*, (2024), kedelai yang ditanaman pada kondisi stres kekeringan juga memiliki perbedaan kandungan protein yang signifikan lebih tinggi dibandingkan kedelai pada status air yang normal.

Secara keseluruhan, prolin merupakan molekul yang berperan dalam berbagai aspek respons tanaman terhadap cekaman kekeringan. Perannya mencakup kontribusi dalam penyesuaian osmotik, stabilisasi protein dan membran,

regulasi keseimbangan redoks, interaksi dengan sistem antioksidan, serta sebagai cadangan energi, sehingga menjadikannya salah satu indikator penting dalam studi ketahanan tanaman terhadap cekaman lingkungan (Hossain *et al.*, 2019). Selain dengan meningkatnya prolin, tanaman juga memproduksi enzim antioksidan yang berperan untuk mendegradasi kelompok ROS sebagai adaptasi kondisi stres kekeringan (Qiao *et al.*, 2024).

Enzim *Superoxide dismutase* (SOD), *peroxidases* (POD), and catalase (CAT) merupakan enzim yang berperan penting dalam menurunkan kadar ROS dalam tanaman, selain itu enzim-enzim tersebut juga menjadi parameter untuk mengetahui seberapa baik tanaman beradaptasi dalam kondisi stres kekeringan (Du *et al.*, 2020). Langkah adaptasi tanaman pada kondisi stres kekeringan lainnya, adalah dengan menginduksi peningkatan hormon ABA (*Abscisic Acid*) untuk menurunkan total klorofil, agar fotosintesisnya menurun, sehingga laju penggunaan airnya juga berkurang (Qiao *et al.*, 2024), meskipun begitu adaptasi tersebut tetap mengarah pada pertumbuhan dan perkembangan yang tidak optimal dan menyebabkan penurunan hasil panen, sehingga diperlukan perlakuan tambahan untuk meminimalisir dampak dari stres kekeringan.

Kekeringan merupakan salah satu stres abiotik yang menyebabkan menurunnya aktivitas fotosintesis, gangguan metabolisme, dan berkurangnya produktivitas tanaman. Air berperan penting dalam proses fisiologis tanaman seperti transportasi unsur hara, pembentukan klorofil, serta pembentukan hasil fotosintesis. Oleh karena itu, ketersediaan air yang cukup merupakan faktor utama yang menentukan pertumbuhan dan hasil tanaman. Fenomena keterkaitan antara air

dan pertumbuhan tanaman telah dijelaskan dalam Al-Qur'an. Allah SWT berfirman dalam Q.S. *An-Nahl* [16]: 10–11:

هُوَ الَّذِي أَنْزَلَ مِنَ السَّمَاءِ مَاءً لَكُمْ مِنْهُ شَرَابٌ وَمِنْهُ شَجَرٌ فِيهِ تُسِيمُونَ ۝ ١٠ يُنْبِتُ لَكُمْ بِهِ الزَّرْعَ وَالزَّيْتُونَ وَالنَّخِيلَ وَالْأَعْنَابَ وَمِنْ كُلِّ الثَّمَرَاتِ إِنَّ فِي ذَلِكَ لَآيَةً لِقَوْمٍ يَتَفَكَّرُونَ ۝ ١١

Artinya: “(10) Dialah yang telah menurunkan air (hujan) dari langit untuk kamu. Sebagiannya menjadi minuman dan sebagiannya (menyuburkan) tumbuhan yang dengannya kamu menggembalakan ternak. (11) Dengan (air hujan) itu Dia menumbuhkan untukmu tumbuh-tumbuhan, zaitun, kurma, anggur, dan segala macam buah-buahan. Sesungguhnya pada yang demikian itu benar-benar terdapat tanda (kebesaran Allah) bagi orang yang berpikir.” (Q.S. *An-Nahl* [16]: 10–11).

Menurut *Tafsir Ibnu Katsir*, ayat ini menunjukkan keluasan nikmat Allah SWT dalam menurunkan air sebagai sumber kehidupan seluruh makhluk. Dari air yang sama, tumbuh berbagai jenis tanaman dengan warna, bentuk, dan rasa yang berbeda, menandakan keagungan ciptaan Allah (Katsir 2008). Sedangkan *Tafsir Al-Muyassar* menjelaskan bahwa ayat ini menjadi dorongan agar manusia berpikir dan meneliti fenomena alam, karena dari proses itu manusia dapat memahami manfaat ciptaan Allah dan menggunakannya dengan bijak. Hal ini dapat dianalogikan sebagai pengaruh air terhadap pertumbuhan kedelai, dimana ketika kedelai kekurangan air, maka akan berpengaruh terhadap kualitas dan kuantitas kedelai yang tumbuh pada tanah yang kekurangan air tersebut. Dengan begitu, penelitian tentang respon tanaman terhadap ketersediaan air merupakan bentuk pengamalan nilai tersebut, yaitu berusaha memahami mekanisme kehidupan melalui ilmu pengetahuan.

2.3 Peran Unsur Hara Zink (Zn) pada Kondisi Kekeringan

Zink merupakan mikronutrien penting tumbuhan. Peranan zink sangat banyak mulai dari sintesis klorofil, metabolisme asam amino dan lain sebagainya. Kebutuhan zink dan cara penyerapan zink berbeda beda pada setiap jenis tanaman. Pada umumnya akar menyerap zink dalam bentuk ion divalen (Zn^{2+}). Namun, pada kasus tertentu, akar dapat menyerap zink yang sudah berikatan dengan senyawa organik (Hassan *et al.*, 2020). Mekanisme penyerapan zink ada dua pendekatan, yang pertama tanaman akan mengeluarkan asam organik dan ion H^+ yang meningkatkan kelarutan kompleks zink, menjadi bentuk Zn^{2+} sehingga mudah diserap sel epidermis akar. Strategi yang kedua, akar tanaman akan melepaskan senyawa fitosiderofor. Senyawa tersebut memiliki ukuran yang sangat kecil dan berfungsi mengikat zink dengan kuat, sehingga membentuk kompleks yang mudah di serap oleh akan, akan tetapi strategi kedua ini hanya ditemukan pada tanaman sereal. Mekanisme masuknya zink lainnya sebagian bersifat pasif (Hassan *et al.*, 2020).

Proses masuknya zink ke jaringan epidermis akar secara pasif difasilitasi oleh pergerakan air dan perbedaan muatan listrik pada membran sel akar. Energi utama yang membantu proses ini berasal dari aktivasi enzim enzim H^+ -ATPase pada membran plasma akar. Enzim ini memompa ion H^+ keluar sel dengan memecah ATP, menyebabkan muatan listrik di dalam sel menjadi lebih negatif (hiperpolarisasi) dan pH di sekitar akar menurun. Kondisi ini membuat ion bermuatan positif seperti Zn^{2+} lebih mudah masuk ke dalam akar. Akan tetapi, Zn^{2+} tidak bisa melewati membran sel begitu saja karena bermuatan. Oleh karena itu,

tanaman memiliki protein khusus yang disebut transporter Zn, yang mengatur keluar masuknya Zn^{2+} antar sel dan organel (Hassan *et al.*, 2020).

Protein transporter akan membawa zink masuk ke dalam sel jaringan akar dan bergerak menuju jaringan pengangkut xilem, yang mana proses ini disebut *xylem loading*. Proses pemindah ke jaringan xilem ini memerlukan energi karena melawan perbedaan muatan listrik. Aktivitas H^+ -ATPase yang tinggi di jaringan xilem membuat cairan xilem bersifat agak asam (pH 5–6,5). Dalam cairan ini, Zn tidak mengalir sebagai ion bebas, tetapi terikat dengan asam organik (OA), histidin, atau asparagin agar tetap stabil selama transport. Dari xilem zink didistribusikan ke berbagai organ tanaman dan sebagian masuk dalam jaringan floem untuk transport lebih lanjut. Pada akhirnya zink yang sudah sampai pada organ tujuan akan digunakan untuk berbagai metabolisme, aktivasi enzim, pembentukan klorofil dan metabolisme protein, sehingga pasokan zink yang cukup sangat penting untuk pertumbuhan dan perkembangan tanaman dengan baik (Hassan *et al.*, 2020), hal tersebut di dicontohkan pada Aplikasi zink yang dilakukan oleh Yasari & Vahedi (2012) pada tanaman kedelai menunjukkan peningkatan hasil panen dibandingkan tanaman tanpa kontrol (tabel 2.2).

Tabel 2.1 Peningkatan hasil panen kedelai setelah aplikasi pupuk zink

Metode & Perlakuan	Oil (%)	Protein (%)	Seed Yield (g/m ²)
<i>Soil Application</i>			
<i>Control</i>	22.23	35.09	112.3
<i>Zn to Soil</i>	22.73	35.45	141.6
<i>Foliar Spray</i>			
<i>Control</i>	21.69	33.57	117.7
<i>Zn Foliar</i>	25.03	33.24	146.3

(Yasari & Vahedi, 2012)

Aplikasi zink juga memiliki manfaat yang signifikan pada kondisi stress kekeringan. Pada saat pertumbuhan awal tanaman pada fase perkecambahan, benih yang diberi perlakuan zink di bawah kondisi kekeringan, terbukti meningkatkan daya perkecambahan dan pertumbuhan awal, hal tersebut karena zink membantu pembentukan hormon seperti IAA dan GA₃ yang berperan dalam pemanjangan plumula dan pertumbuhan bibit, pada fase pertumbuhan selanjutnya, zink juga berperan dalam menjaga stabilitas membran sel (Hassan *et al.*, 2020). Selain itu kondisi kekeringan akan mempengaruhi stabilitas membran sel akibat produksi ROS yang berlebihan, sehingga akan terjadi kebocoran ion dan kerusakan metabolik, akan tetapi zink dapat meningkatkan aktivitas enzim antioksidan seperti SOD dan POD yang menyebabkan penurunan ROS, sehingga kerusakan membran dapat diminimalisir. Selain itu zink juga berperan meningkatkan akumulasi senyawa osmolit, seperti prolin, glisin, gula terlarut dan protein terlarut. Senyawa-senyawa osmolit tersebut membantu menjaga tekanan turgor. Zink juga berperan

dalam efisiensi penggunaan air, saat kekeringan stomata menutup, dengan pemberian zink stomata dapat memperbaiki fungsi sel penjaga pada stomata karena zink membantu mempertahankan kandungan K^+ dalam sel serta memperkuat membran sel stomata, sehingga pengaturan buka tutup stomata optimal. Selain itu pada kondisi stres kekeringan, kemampuan akar untuk menyerap nutrisi seperti Fe, Mn dan N menurun (Hassan *et al.*, 2020).

Penambahan Zink pada kondisi stress kekeringan terbukti meningkatkan kemampuan akar dalam menyerap nutrisi, meskipun demikian interaksi antara Zink dan unsur nutrisi lainnya belum sepenuhnya dipahami pada proses penyerapan nutrisi di kondisi stres kekeringan. Lebih lanjut zink juga dapat menjaga laju fotosintesis, peningkatan kadar klorofil, aktivitas rubisco dan efisiensi fotosistem II. Hal tersebut karena zink merupakan komponen struktural lebih dari 300 enzim, termasuk karbonat anhidrase dan aldolase yang berperan dalam proses metabolisme. Aplikasi zink terbukti meningkatkan kandungan klorofil, memperbaiki struktur rubisco dan meningkatkan efisiensi fotosintesis, selain itu zink juga menurunkan konsentrasi CO_2 sub stomal (C_i) yang menandakan peningkatan kemampuan tanaman dalam memanfaatkan CO_2 untuk fotosintesis. (Hassan *et al.* 2020) Akan tetapi, kelebihan zink juga dapat menimbulkan efek toksisitas.

Penelitian yang dilakukan oleh Pawlowski *et al.* (2019) menunjukkan bahwa kedelai ditanam pada media pasir silika dengan suplai larutan hara Hoagland yang mengandung empat taraf konsentrasi $ZnSO_4$, yaitu 0; 0,2; 2; dan 200 μM . Pada konsentrasi 0 hingga 0,2 μM , tanaman menunjukkan gejala defisiensi seng berupa

klorosis dan penurunan biomassa. Sebaliknya, pada konsentrasi 2 μM pertumbuhan dan hasil tanaman berada pada kondisi optimum. Namun, ketika konsentrasi dinaikkan hingga 200 μM tanaman mengalami toksisitas zink yang ditandai oleh penurunan tinggi tanaman, berkurangnya massa akar, serta munculnya nekrosis pada daun. Hasil ini menunjukkan bahwa ambang optimum seng bagi kedelai adalah sekitar 2 μM di kondisi media pasir silika, sedangkan konsentrasi di atas 200 μM telah bersifat toksik terhadap pertumbuhan tanaman kedelai.

2.4 Aplikasi nanoteknologi dalam Pertanian

Teknologi Nanopartikel merupakan suatu inovasi yang telah memecahkan banyak permasalahan global, termasuk industri pertanian. Nanopartikel adalah partikel apapun yang memiliki ukuran 10-100 nm, dengan ukuran yang sangat kecil, partikel berbentuk nano memiliki kelebihan dalam pertukaran ion, difusi, absorpsi ion dan pembentukan kompleks dengan molekul lainnya, sehingga pupuk yang berupa nanopartikel dapat dengan mudah masuk dalam jaringan tanaman khususnya yang berukuran 5-20 nm dapat menembus penghalang seluler, sehingga tanaman dapat meminimalisir penggunaan energi untuk penyerapan aktif. Kelebihan pupuk nanopartikel lainnya yang diaplikasikan secara terkontrol, adalah meningkatkan efisiensi pemupukan, degradasi tanah dan meminimalisir efek toksisitas tanah akibat penggunaan pupuk kimia konvensional (Semenova *et al.*, 2024). Penelitian terdahulu telah membuktikan efektivitasnya, seperti aplikasi nanokomposit pada tanah berpasir yang melepaskan nitrogen 78% lebih banyak daripada pupuk konvensional (Verma, *et al.*, 2023). Selain itu aplikasi nanopartikel enkapsulasi, seperti nanopartikel polimer kitosan yang dapat terurai secara hayati

telah digunakan untuk pelepasan secara terkontrol pupuk NPK seperti urea. Menurut Liu & Lal (2015), pupuk nanopartikel diklasifikasikan berdasarkan komposisinya, yakni pupuk nano makronutrien, pupuk nano mikronutrien, pupuk nano bermuatan nutrisi, dan nanomaterial penambah pertumbuhan tanaman. Salah satu pupuk nanopartikel yang tergolong dalam nano mikronutrien adalah zink oksida ukuran partikel atau *zink oxidation partikel size* (ZnO NPs) (Semenova *et al.*, 2024). Aplikasi ZnO NPs memiliki kelebihan, khususnya yang diaplikasikan pada daun, meminimalisir pencemaran lingkungan tanah.



Gambar 2.4 Skema penyerapan pupuk nanopartikel, (Semenova et al., 2024).

Pada dasarnya aplikasi pupuk nanopartikel dapat diaplikasikan lewat penyemprotan daun dan penyemprotan tanah (Gambar 2.4). Pada metode penyemprotan di daun, metode ini memanfaatkan Penetrasi nanopartikel lewat stomata sebagai jalur penyerapan utama pada permukaan daun. Meskipun nanopartikel dapat masuk lewat epidermis, hal ini sangat terbatas, karena ukuran pori pori yang lebih kecil, partikel nano yang lebih besar dari 20 nm sangat terbatas ketika melewati dinding sel. Umumnya, stomata hanya terletak di permukaan

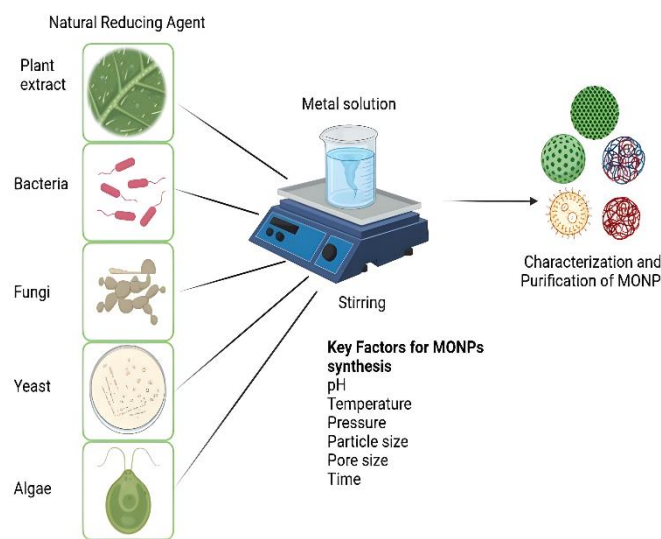
bawah daun, tetapi ada stomata di permukaan atas daun pada beberapa spesies, yang meningkatkan kemungkinan bahwa NP dapat diserap pada permukaan daun. Selain itu, daun muda biasanya memiliki kemampuan yang lebih tinggi untuk menyerap nutrisi dibandingkan dengan daun yang lebih dewasa karena daun baru memiliki lapisan lilin yang lebih tipis dan masih kurang berkembang secara fisiologis untuk menghambat penyerapan logam (Hong *et al.*, 2021). Hal ini telah diamati oleh Rawat *et al.* (2017) pada benih yang sedang berkembang yang menyerap nutrisi melalui daun muda karena kurangnya lilin daun yang berkembang dengan baik.

Dibandingkan metode penyemprotan di daun, Metode penyemprotan pupuk nanopartikel di tanah, tidak jauh berbeda dengan pupuk konvensional, akan tetapi karena kuantitasnya lebih tinggi dan memiliki total luas permukaan per volume lebih tinggi, penyerapan pupuk nanopartikel lebih efisien dan cepat (Semenova *et al.*, 2024). Aplikasi penyemprotan ditanah sangat bergantung pada kondisi tanah, seperti proses penempelan di partikel tanah (adsorpsi), pelepasan kembali ke larutan tanah (desorpsi), pergerakan menuju akar (transport), dan perubahan bentuk kimia (transformasi) dapat menurunkan efektivitas pemupukan (Semenova *et al.*, 2024). Sehingga aplikasi nanopartikel di daun dinilai lebih optimal jika dibandingkan aplikasi ditanah.

2.5 Sintesis Nanopartikel Berbasis Biologis (*Green Synthesized*)

Sintesis Nanopartikel logam atau *Metal oxide nanoparticles* (MONPs) seperti ZnO pada metode konvensional didasarkan pada proses fisik dan kimia yang melibatkan zat berbahaya dan mahal, serta membutuhkan energi yang besar, sehingga mendorong inovasi lebih ramah lingkungan. Alternatifnya, Nanopartikel

logam dapat disintesis dengan metode *Green Synthesized*. Metode *Green Synthesized* didasarkan bantuan biomolekul dari organisme seperti tumbuhan, bakteri, fungi dan alga (Gambar 2.5).

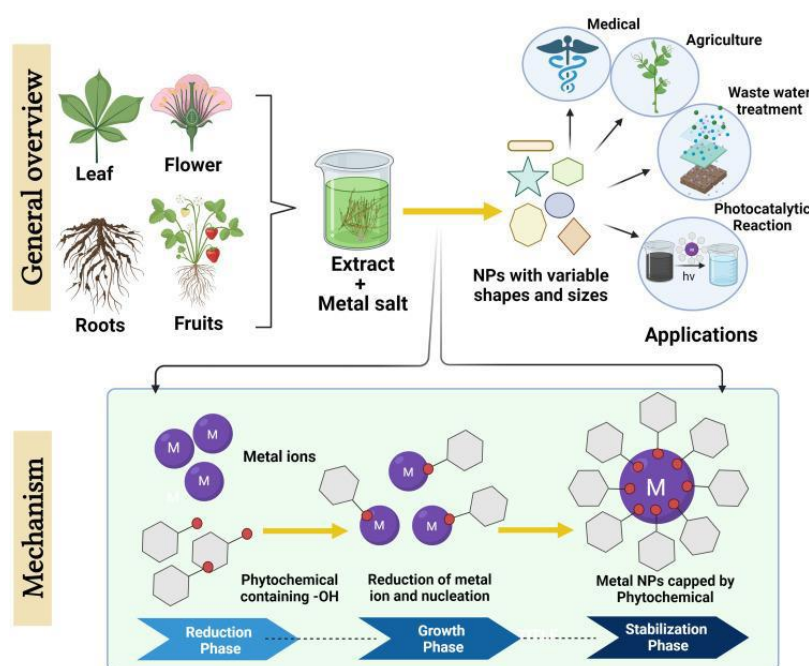


Gambar 2.5 Macam substansi biologis yang dapat dipakai *Green Synthesized* (Alabdallah et al., 2021).

Dengan bantuan biomolekul yang terkandung dalam organisme-organisme tersebut (Gambar 2.5), partikel logam akan direduksi membentuk struktur nano dan menjadi agen *capping* untuk menghambat agregasi nanopartikel sehingga partikel nano yang dihasilkan dalam keadaan stabil (Alabdallah *et al.*, 2021). *Green Synthesized* memiliki kelebihan dibandingkan metode fisikokimia, karena metodenya lebih sederhana, dan hemat biaya, serta ramah lingkungan (Tănase *et al.* 2021; Benitez-Salazar *et al.* 2021).

Tanaman merupakan substansi biologis yang paling banyak dijadikan sumber untuk *Green Synthesis* nanopartikel logam (Gambar 2.6). Hal tersebut, dikarenakan fakta bahwa substansi nabati lebih hemat biaya, tidak beracun dan hampir semua bagian tanaman seperti daun, biji, buah dan akar dapat diekstraksi

secara langsung dengan pelarut etanol atau air suling (Bandeira, *et al.*, 2020). Telah diketahui bahwa tanaman memiliki senyawa aktif seperti metilxantin, asam fenolik, flavonoid dan saponin, yang berperan sebagai agen antioksidan untuk menetralkan senyawa ROS, sehingga kemampuan senyawa aktif sebagai reduktan tersebut, dimanfaatkan untuk mereduksi senyawa logam dan sebagai agen penstabil pada metode Green Synthesized (Bandeira *et al.*, 2020).



Gambar 2.6 Skema mekanisme *Green Synthesized* nanopartikel logam (Singh *et al.*, 2023)

Mekanisme lebih tepat, bagaimana setiap senyawa berperan sebagai bioreduktor secara kimia membentuk nanopartikel logam yang stabil masih belum diketahui secara pasti (Bandeira, *et al.* 2020; Singh *et al.* 2023), akan tetapi Singh *et al.* (2023) merekomendasikan jalur yang masuk akal untuk perkiraan sintesisnya. Secara sederhana, berdasarkan perkiraan Singh *et al.* (2023) (Gambar 2.4), pada awalnya ion logam seperti Ag^+ , Au^{3+} , Cu^{2+} , dan Zn^{2+} ketika bertemu senyawa aktif

dari tumbuhan, ion logam akan berinteraksi membentuk suatu kompleks, kemudian elektron dari senyawa aktif mengalami oksidasi sehingga melepaskan elektron, elektron yang terlepas tersebut akan mereduksi ion logam menjadi bentuk atom netral. Selain itu, atom logam bermuatan netral (M^0), atom atom tersebut beragregasi membentuk inti (nucleus). Tahap nukleasi ini diikuti oleh pertumbuhan partikel melalui proses *Ostwald ripening*, yang mana dalam proses ini partikel kecil yang tidak stabil akan berpindah ke partikel yang lebih stabil, dengan peningkatan suhu atau pH proses agregasi tersebut semakin lama semakin besar, sampai membentuk partikel nano, lebih lanjut substansi biomolekul tanaman juga bertindak sebagai pembungkus /*capping* dan agen stabilisator seperti gugus karbonil, amina dan hidroksi dari senyawa polifenol, flavonoid dan protein yang menempel pada permukaan nanopartikel melalui ikatan hidrogen.

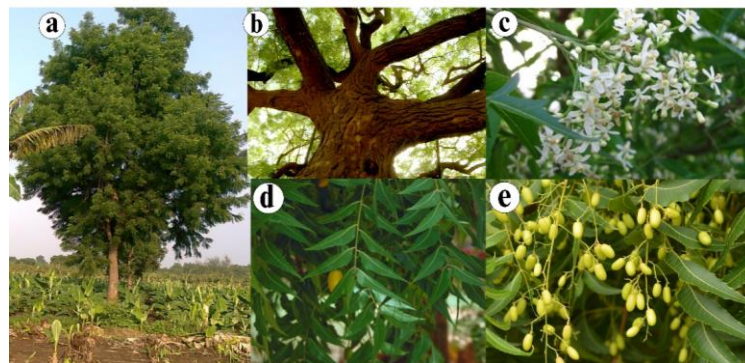
Mengenai *Green Synthesized ZnO NP*, penelitian terdahulu oleh Singh *et al.* (2018), menunjukkan bahwa ion seng (II) direduksi oleh senyawa aktif tanaman menjadi seng metalik, alih-alih membentuk kompleks terkoordinasi dengannya. Setelah bioremediasi seng, seng metalik bereaksi dengan oksigen terlarut yang terdapat dalam larutan untuk membentuk inti ZnO. Senyawa tanaman juga diduga berperan sebagai stabilisator yang mencegah penggumpalan partikel dan pertumbuhan kristal (Singh *et al.*, 2017).

2.6 *Azadirachta indica* (mimba) sebagai Agen Biosintesis

Azadirachta indica atau mimba merupakan pohon yang termasuk dalam keluarga Meliaceae dengan kemampuan tumbuh cepat dan dapat mencapai tinggi 15–20 meter, dan jarang mencapai 35–40 meter (Gambar 2.7a) (Uzzaman, 2020).

Posisi taxon *Azadirachta indica* lebih rinci, dapat dilihat pada sistematika dibawah ini (Sarkar *et al.*, 2021):

Kingdom	: Plantae
Division	: Magnoliophyta
Class	: Eudicot
Order	: Sapindales
Family	: Meliaceae
Genus	: <i>Azadirachta</i>
Species	: <i>Azadirachta indica</i>



Gambar 2.7 Morfologi *Azadirachta indica* : (a) Pohon mimba (Abhijet, 2024), (b) Percabangan dan kanopi pohon mimba tua (Poehlsen, 2024), (c) Daun menyirip genap. (d) Bunga mimba berwarna putih (Palash, 2024), (e) buah nem (Ciesla, 2024).

Pohon ini selalu hijau, tetapi pada musim kemarau yang parah, sebagian besar atau hampir seluruh daunnya dapat rontok (Uzzaman, 2020). Batang bercabang panjang dan menyebar membentuk mahkota bundar yang lebar, berkayu keras (Gambar 2.7b). Daunnya berseling, majemuk menyirip sempurna, anak daun berjumlah 8-6 pasang berhadapan, helaian daun lonjong dengan panjang 4,0-7,0 cm dan lebar 1,5-3,2 cm (Gambar 2.7d). Perbungaannya bertipe indeterminate dengan

bunga berwarna putih (Gambar 2.7c). Buahnya berbiji, berwarna hijau pucat, gundul, lonjong, panjang sekitar 1,4 cm dan lebar 1,5 cm (Gambar 2.7e) (Zin & Oo, 2020). Setiap bagian pohon mimba memiliki khasiat sebagai obat medis, potensi tumbuhan mimba tersebut telah dimanfaatkan sebagai obat tradisional india sejak dahulu. mimba diketahui memiliki kandungan senyawa bioaktif yang tinggi, sehingga pemanfaatan agen antioksidan, aktivitas antiinflamasi, antiangiogenic, imunomodulatori, dan aktivitas apoptosis sangatlah baik (Sarkar *et al.*, 2021).

Senyawa bioaktif mimba seperti Azadirachtin juga dapat dimanfaatkan sebagai biopestisida (Sarkar *et al.*, 2021). Dengan tingginya kandungan bioaktif tersebut, mimba memiliki potensi yang besar sebagai agen *Green Synthesized* nanopartikel logam, khususnya zink. Hal tersebut telah diungkapkan oleh penelitian Nath & Banerjee (2013), yang mensintesis senyawa emas dan silver menggunakan ekstrak daun mimba, didapati terpenoid merupakan senyawa utama yang berperan sebagai reduktor dan stabilitas nanopartikel yang dibuat. Lebih lanjut penelitian Rathore & Mohit (2013) menunjukkan mimba memiliki sifat hiperakumulator dan dari hasil pengamatanya, daun mimba dapat menampung 32.6 $\mu\text{g/g}$ zink. Dengan tingginya kadar zink pada daun mimba ini, sintesis nanopartikel zink menggunakan ekstrak daun mimba memiliki kelebihan tersendiri.

Bhuyan *et al.*, (2015) telah mengevaluasi *Green Synthesized ZnO* dengan memanfaatkan daun mimba, yang mana sintesis nanopartikel ZnO mereka berhasil dilakukan dengan ukuran partikel diperoleh berkisar 9,6–25,5 nm, berbentuk bulat, dengan celah pita 3,87 eV, dan berstruktur wurtzite. Lebih lanjut, penelitian mereka

juga mengungkapkan ZnO yang dibuat, dapat menghambat pertumbuhan bakteri gram positif dan negatif, sehingga partikel ini juga berperan sebagai antimikroba..

Pemanfaatan unsur hara mikro seperti Zn dan bahan alami seperti ekstrak mimba dalam pengembangan *nano fertilizer* merupakan salah satu inovasi yang mendukung pertanian berkelanjutan. Upaya ini menunjukkan peran manusia dalam menjaga keseimbangan ekosistem melalui ilmu pengetahuan dan teknologi. Sebagaimana Allah SWT berfirman dalam Q.S. 'Abasa [80]: 24–32:

فَلْيَنْظُرِ الْإِنْسَانُ إِلَى طَعَامِهِ ۚ ٢٤ أَنَا صَبَبْنَا الْمَاءَ صَبًّا ٢٥ ثُمَّ شَقَقْنَا الْأَرْضَ شَقًّا ٢٦ فَأَنْبَتْنَا فِيهَا حَبًّا ٢٧ وَعَنْبًا
وَقَضَبًا ٢٨ وَزَيْتُونًا وَنَخْلًا ٢٩ وَحَدَائِقَ غُلَبًا ٣٠ وَفَاكِهَةً وَأَبًّا ٣١ مَتَاعًا لَّكُمْ وَلِأَنْعَامِكُمْ ٣٢

Artinya: “(24) Maka, hendaklah manusia itu memperhatikan makanannya. (25) Sesungguhnya Kami telah mencurahkan air (dari langit) dengan berlimpah. (26) Kemudian, Kami belah bumi dengan sebaik-baiknya. (27) Lalu, Kami tumbuhkan padanya biji-bijian, (28) anggur, sayur-sayuran, (29) zaitun, pohon kurma, (30) kebun-kebun (yang) rindang, (31) buah-buahan, dan rerumputan. (32) (Semua itu disediakan) untuk kesenanganmu dan hewan-hewan ternakmu.” (Q.S. 'Abasa [80]: 24–32).

Dalam *Tafsir Ibnu Katsir*, ayat ini menyeru manusia agar merenungkan asal usul makanan mereka sebagai bukti kekuasaan Allah yang menumbuhkan berbagai tanaman dari tanah. Semua hasil bumi merupakan karunia Allah yang patut dijaga dan dimanfaatkan dengan benar (Katsir 2008). Sementara *Tafsir Al-Misbah* menjelaskan bahwa ayat ini mengandung dorongan ilmiah agar manusia memperhatikan proses biologis tumbuhan dan mengelola sumber daya alam secara bertanggung jawab (Shihab 2002). Pengembangan inovasi seperti *nano fertilizer* ZnO-NP berbasis bahan alami adalah bentuk konkret dari pemenuhan tanggung

jawab tersebut, yakni mengelola ciptaan Allah dengan ilmu pengetahuan, rasa syukur, dan prinsip keberlanjutan.

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Rancangan Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian experimental dengan pendekatan kualitatif dan kuantitatif. Pendekatan kualitatif digunakan untuk mengetahui kualitas nanopartikel yang dihasilkan pada penelitian ini, berdasarkan rata rata ukuran nanopartikel yang diperoleh dan homogenitasnya, serta berdasarkan gugus kimia yang terbentuk pada sampel nanopartikel yang disintesis. Selain itu, untuk pendekatan kuantitatif digunakan untuk mengetahui pengaruh aplikasi nanopartikel yang diperoleh pada kedelai menggunakan rancangan Acak Kelompok (RAK) Faktorial 5 X 3. Variabel bebas dalam uji faktorial tersebut meliputi: Faktor A adalah cekaman kekeringan dengan 3 tingkat cekaman,yakni:

1. K1 = 100% kapasitas lapang
2. K2 = 75% kapasitas lapang
3. K3 = 50% kapasitas lapang

Faktor B adalah pemberian pupuk nanopartikel zink sintesis daun mimba (*Azadirachta indica*) dengan beberapa taraf yakni :

1. PO = tanpa pupuk zink (kontrol negatif)
2. P1 = ZnO NP 100ppm
3. P2 = ZnO NP 200ppm
4. P3 = ZnO NP 300ppm
5. P4 Kontrol positif = $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 400ppm (kontrol positif)

kombinasi faktorial tersebut memiliki total 15 kombinasi yang dibuat tiga kali ulangan, sehingga terdapat 45 unit percobaan secara keseluruhan. Dalam satu ulangan diacak lengkap dengan fitur acak rentang pada software Google spreadsheet (tabel 3.1)

Tabel 3.1 Denah pengacakan

ULANGAN 1		ULANGAN 2		ULANGAN 3	
K2P2 (I)	K1P1 (I)	K2P3 (II)	K3P2 (II)	K3P3 (III)	K1P2 (III)
K3P2 (I)	K1P0 (I)	K1P0 (II)	K3P1 (II)	K2P3 (III)	K3P1 (III)
K3P1 (I)	K3P3 (I)	K3P0 (II)	K1P3 (II)	K2P2 (III)	K3P4 (III)
K2P3 (I)	K1P2 (I)	K3P4 (II)	K2P1 (II)	K2P0 (III)	K1P4 (III)
K1P3 (I)	K2P1 (I)	K1P2 (II)	K2P4 (II)	K3P0 (III)	K1P0 (III)
K2P0 (I)	K2P4 (I)	K1P1 (II)	K2P2 (II)	K3P2 (III)	K1P1 (III)
K3P4 (I)	K3P0 (I)	K3P3 (II)	K1P4 (II)	K2P1 (III)	K2P4 (III)
K1P4 (I)		K2P0 (II)		K1P3 (III)	

variabel terikat dalam penelitian adalah, Kandungan prolin ($\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ FW). Selain itu variabel yang dijaga agar tidak mempengaruhi hasil penelitian meliputi pemakaian genotipe kedelai varietas Dega 1, komposisi media tanaman yang dipakai, awal umur tanaman, frekuensi penyiraman, volume pemupukan, serta alat dan bahan yang dipakai pada analisis parameter biokimia kedelai menggunakan tipe dan ukuran yang sama.

3.2 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian dilaksanakan pada tanggal 29 Januari 2026 - 25 Mei 2026 dan bertempat di Laboratorium Program Studi Biologi, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang, yang meliputi Pembuatan nanopartikel zink ekstrak *Azadirachta indica* di Laboratorium Kultur Jaringan Tanaman dan analisis kandungan prolin di laboratorium program studi kimia. Untuk Penanaman dan

aplikasi perlakuan dilaksanakan di *Greenhouse* Badan Perakitan dan Modernisasi Pertanian (BRMP) Aneka kacang, Desa Kendalpayak, Kec. Pakisaji Kab. Malang. Selain itu, untuk uji PSA dilakukan di laboratorium sinar X Kec. Sukolilo, Kota Surabaya, sedangkan untuk uji FITR dilakukan di Laboratorium Mineral dan Material Maju Universitas Negeri Malang.

3.3 Alat dan Bahan

3.3.1 Alat

Alat yang digunakan dalam penelitian ini meliputi gelas ukur, erlenmeyer, beaker glass, pipet volume, corong kaca, tabung reaksi, timbangan analitik, *hot plate*, dan Semprotan (*hand sprayer*) dipakai untuk sintesis dan aplikasi nanopartikel ZnO, sedangkan *Particle size Analyser* (DelsaTM Nano C, Beckman Coulter, Brea, CA) dan FTIR Shimadzu digunakan untuk karakterisasi nanopartikel. Timbangan 15 kg, gelas ukur dan oven untuk perlakuan stres kekeringan. Meja asam, Sentrifugator, Spektrofotometri UV-Vis -WPA Biowave II (Version 7121 V 1.7.0), Biochrom Ltd., UK dan *water bath* untuk analisis kandungan prolin.

3.3.2 Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah simplisia daun mimba (*Azadirachta indica*) yang didapat dari Lansida (Yogyakarta), Serbuk Zinc sulfate heptahydrate ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $\geq 99\%$ *purity*, BioWorld, USA), Kertas saring (Whatman No.1) akuades, tanah, kompos kotoran kambing pupuk fospat (SP 26, Petro), Pupuk KCl (Mahkota Fertilizer MOP) dan pupuk urea. Biji kedelai (*Glycine*

max var. Dega 1). Untuk uji prolin memakai ninhidrin, asam fosfat, asam sulfosalisilat, asam asetat glasial, dan toluena.

3.4 Prosedur Penelitian

Prosedur yang dilaksanakan pada penelitian ini ialah sebagai berikut:

3.4.1 Sintesis Nanopartikel zink ekstrak *Azadirachta indica*

Proses Sintesis Nanopartikel zink menggunakan ekstrak daun *Azadirachta indica* dilakukan dengan mengacu pada metode Salih *et al.*, (2021) dengan beberapa modifikasi. Proses ini diawali dengan sterilisasi air deionized water menggunakan millipore ukuran saring 0.2 μm . Setelah itu, 5 gram serbuk daun mimba dilarutkan dengan 100 ml deionized water dan dihomogenisasikan pada suhu kurang dari 80 °C dengan kecepatan 300 rpm selama 40 menit. Setelah itu, larutan disaring menggunakan kertas saring dalam alat vacuum pump untuk memisahkan sisa ampas sehingga diperoleh filtrat jernih sebanyak 100 ml sebagai ekstrak mimba.

Filtrat ekstrak mimba yang diperoleh kemudian langsung digunakan dalam tahap biosintesis nanopartikel. tahap sintesis nanopartikel dilakukan dengan melarutkan 0,05 mM $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ dalam 100 mL *deionized water* (Lampiran 1), kemudian dicampurkan dengan ekstrak mimba menggunakan perbandingan 2:2 (v/v). Campuran tersebut dihomogenisasi dengan kecepatan 400 rpm pada suhu 40 °C selama ± 24 jam. Setelah proses homogenisasi selesai, larutan didinginkan kemudian dikeringkan dengan cara freezer dry untuk mendapatkan bubuk nanopartikel.

3.4.2 Uji PSA

Uji *Particle Size Analyzer* (PSA) menggunakan metode *Dynamic Light Scattering* (DLS) bertujuan untuk memastikan bahwa partikel yang dihasilkan dari sintesis nanopartikel berada pada skala nanometer dan memiliki stabilitas dispersi yang baik sebelum diaplikasikan pada tanaman. Pertama, 0,5 gram ZnO-NPs diencerkan dengan 10 mL aquades untuk menghindari terjadinya aglomerasi partikel. Pengukuran dilakukan menggunakan alat Delsa™ Nano (*Beckman Coulter*) yang bekerja berdasarkan prinsip *Dynamic Light Scattering* (DLS). Prinsip metode ini adalah mengukur fluktuasi intensitas cahaya akibat gerak *Brownian* partikel dalam suspensi, yang kemudian diolah menggunakan persamaan Stokes–Einstein untuk memperoleh nilai diameter hidrodinamik partikel (nm). Parameter utama yang diamati meliputi ukuran rata-rata partikel (*Z-average*) dan homogenitasnya berdasarkan Polydispersity Index (PDI) (Beckman Coulter, 2017).

3.4.3 Uji FTIR (*Fourier Transform Infrared Spectroscopy*)

Analisis gugus fungsi dilakukan menggunakan FTIR Shimadzu dengan metode ATR. Instrumen dinyalakan dan perangkat lunak IRsolution dijalankan hingga sistem siap digunakan. Kristal ATR dibersihkan menggunakan alkohol dan kimwipe untuk menghindari kontaminasi. Pengukuran diawali dengan melakukan background scan tanpa sampel pada rentang bilangan gelombang $400\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$ dengan resolusi 4 cm^{-1} dan jumlah pemindaian 10–20 kali. Selanjutnya, 0,5 g sampel nanopartikel dalam bentuk bubuk ditempatkan pada permukaan kristal ATR hingga menutupi area pengukuran, kemudian ditekan menggunakan clamp agar kontak optimal. Pemindaian sampel dilakukan melalui menu “*Sample*” hingga

diperoleh spektrum inframerah. Selain itu, bubuk mimba dan zink sulfat juga dilakukan uji FTIR untuk membandingkan *paek* yang terbentuk (Winter 2019).

Data yang dihasilkan secara otomatis terkoreksi terhadap background. Spektrum kemudian dianalisis menggunakan fitur *peak detection* untuk mengidentifikasi gugus fungsi berdasarkan posisi puncak serapan pada bilangan gelombang tertentu kemudian dibandingkan dengan literatur untuk mengkonfirmasi gugus kimia (Winter 2019).

3.4.4 Persiapan media & Penanaman kedelai

Media tanam yang berisi tanah dan kompos kotoran kambing pada perbandingan 75% tanah dan 25% kompos dengan berat total 5 kg disiapkan terlebih dahulu. Setelah itu, media tanah ditentukan kapasitas lapangnya dengan metode Gravimetri mengikuti Imakumbili (2019). Langkah awal, tanah ditentukan kadar airnya dengan mengambil 5 gram sampel tanah sebanyak 5 ulangan secara acak, kemudian dioven (105 C, 24 jam) untuk menghitung kadar air tanah. Langkah selanjutnya, tanah disiram sampai jenuh dengan air yang ditandai dengan keluarnya air dibagian bawah polybag dan didinginkan selama 2 hari. Kadar air kemudian diukur kembali dengan cara sama seperti sebelumnya. Setelah itu, kadar air sebelum dan sesudah penyiraman akan ditotal sebagai rujukan kapasitas lapang 100% (lampiran 5).

Proses penanaman diawali dengan merendam biji kedelai dalam air selama 60 menit, kemudian setiap polibag ditanam 4 biji kedelai dengan kedalam 3 cm $\pm$ serta di beri pupuk Pospast 0,675 g per polybag (Lampiran 6). Selanjutnya media tanam disiram sampai kapasitas lapang 100%. Seminggu setelah masa tanam diberi

pupuk urea 0,675 g & KCl 0,675 g per polybag. Lebih lanjut, pada masa awal pembungaan juga diberikan pupuk fosfat 0,675 g, urea 0,675 g & KCl 0,675 g per polybag (Timotiwu *et. al* 2020).

3.4.5 Aplikasi perlakuan

Perlakuan stres kekeringan dan pemupukan ZnO NP dimulai pada fase vegetatif 1 tanaman kedelai. Untuk perlakuan stres kekeringan kapasitas lapang dijaga dengan disiram air setiap seminggu 2 kali sesuai taraf yang telah ditentukan dan dimulai pada fase vegetatif awal yakni 14 HST sampai panen yakni. Sedangkan untuk pemupukan ZnO-NP diaplikasikan sebanyak 30 ml pada 15 HST, 60ml 21 HST dan 90 ml 30 HST perpolybag.

3.4.6 Uji Kandungan Prolin

Prolin diekstraksi mengikuti metode Bates *et al.* (1973). Yakni, dibuat stock Asam-ninhidrin terlebih dahulu dengan memanaskan 1,25 g ninhidrin dalam 30 ml asam asetat glasial dan 20 ml asam fosfat 6 M, sambil diaduk, hingga larut, (Reagen tetap stabil selama 24 jam) dan disimpan pada suhu 4°C. Selanjutnya, 0,25 gram daun segar diambil pada 36 HST, kemudian ditumbuk dalam 5 ml asam sulfosalisilat 3% menggunakan lesung dan alu hingga diperoleh campuran yang homogen. Campuran yang dihasilkan disaring menggunakan kertas saring Whatman No.1. kemudian 1 ml ekstrak dipindahkan pada tabung reaksi. Sampel kemudian ditambahkan 1 ml asam ninhidrin dan 1 ml asam asetat glasial dan diaduk secara menyeluruh. Sampel kemudian dipanaskan dalam *Waterbath* pada suhu 100 °C selama 1 jam, diikuti dengan inkubasi selama 15 menit dalam *ice box*. Akhirnya, 2 ml toluena ditambahkan ke dalam larutan dan diaduk selama 20 detik. Sampel

dibiarkan tanpa gangguan selama 10–15 menit agar kedua fase terpisah sempurna. Supernatan yang mengandung toluena dan prolin digunakan untuk mengukur konsentrasi prolin. Ekstrak yang telah disiapkan diukur pada 520 nm untuk menentukan nilai absorbansi prolin. Selain itu toluena digunakan sebagai blanko.

Penghitungan kadar prolin dilakukan dengan membuat standar kurva prolin murni, dengan variasi konsentrasi prolin 10 ppm, 20 ppm, 30 ppm, 40 ppm, 50 ppm, 60 ppm, 70 ppm, 80 ppm, 100 ppm, 150 ppm dan 200 ppm (Lampiran 7). Semua variasi ini diberi perlakuan yang sama dengan sampel mulai dari penambahan asam sulfosalisilat sampai uji absorbansi. Hasil absorbansi di kalibrasi dan ditentukan $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ FW prolin menggunakan rumus berikut:

$$\text{Proline } (\mu\text{mol g}^{-1}\text{FW}) = \frac{(\mu\text{g proline ml}^{-1}) \times \text{ml toluene}}{115.5 \mu\text{g } \mu\text{mol}^{-1}} \times \frac{1}{\left(\frac{\text{g sampel}}{5}\right)}$$

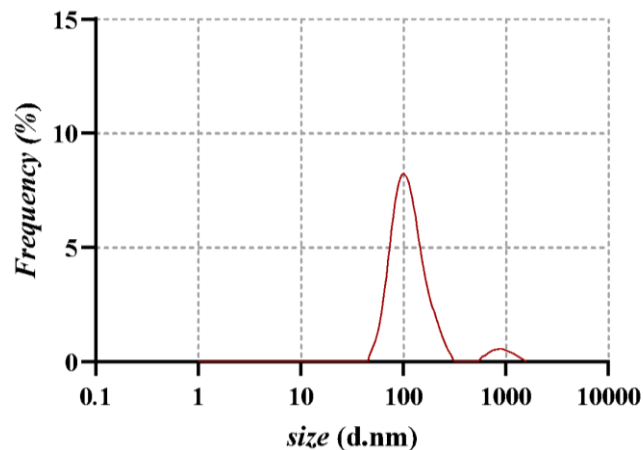
3.5 Analysis Data

Data hasil pengamatan setiap parameter biokimia dianalisis menggunakan *Two-Way* ANOVA dengan software SPSS versi 27. Jika terdapat perbedaan nyata pada hasil analisis, maka dilanjutkan dengan uji pembandingan Duncan.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakteristik nanopartikel zinc

Nanopartikel zink yang disintesis menggunakan ekstrak daun mimba (*A. Indica*) pada penelitian ini berhasil dilakukan. Hal tersebut ditunjukkan pada hasil Uji PSA menggunakan metode DLS yang menunjukkan bahwa distribusi ukuran partikel rata-rata kumulatif sebesar 112,87 nm (Gambar 4.1). Nilai ini mengindikasikan bahwa partikel yang terbentuk masih berada dalam rentang *nanoscale*, meskipun cenderung lebih besar dibandingkan beberapa penelitian lain yang melaporkan ukuran di bawah 100 nm, seperti Sohail *et. al* (2020) dengan rata rata hasil sintesis 21.3 nm dan Kamdi, *et.al* (2026) 56 nm. Akan tetapi, ukuran nanopartikel yang dipadatkan dalam penelitian ini masih lebih kecil jika dibandingkan Ibrahim & Martien (2025) dengan rata rata 368.6 nm yang juga melakukan sintesis zink menggunakan daun mimba.



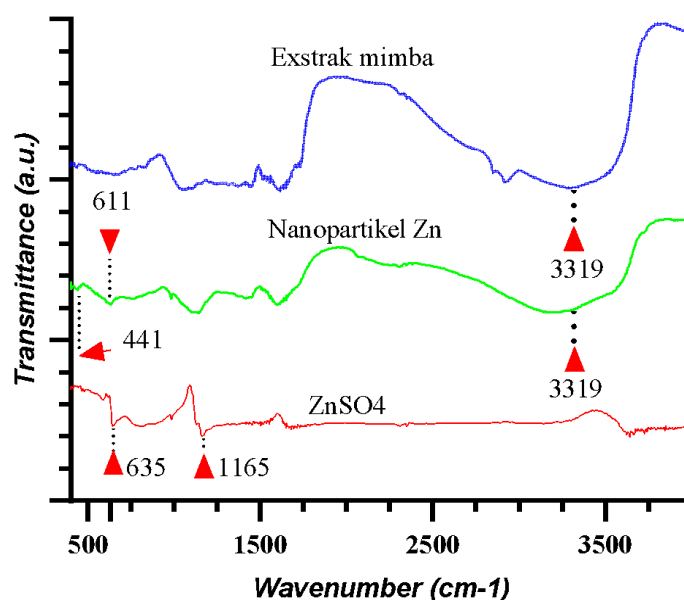
Gambar 4.1 Distribusi ukuran partikel (PSA) nanopartikel ZnO (ZnO-NPs) hasil sintesis menggunakan ekstrak mimba.

Perlu dipahami bahwa metode DLS (*Dynamic light scattering*) bekerja dengan prinsip mendeteksi fluktuasi intensitas cahaya yang dipancarkan oleh

partikel dalam suspensi akibat gerakan Brownian dan tidak memungkinkan pengukuran ukuran partikel individu dalam agregat, serta partikel yang memiliki ukuran yang sangat besar meskipun dengan jumlah yang sangat sedikit, akan sangat mempengaruhi hasil rata rata ukuran kumulatif, sehingga ukuran yang diperoleh umumnya lebih besar dibandingkan hasil SEM atau TEM (Sánchez-Pérez *et. al.*; 2023 Filippove *et.al.*, 2023). Lebih lanjut, nanopartikel yang terbentuk dalam penelitian ini tergolong cukup homogen, dengan nilai polydispersity index (PDI) sebesar 0,201 (Lampiran 2). Berdasarkan standar, nilai PDI antara 0,1–0,7 menunjukkan distribusi ukuran yang relatif seragam dan mendekati *monodisperse system* atau sebagian besar dari partikel dalam media memiliki ukuran yang sama (Sánchez-Pérez *et. al.*, 2023). Lebih lanjut, meskipun masih terdapat sedikit variasi ukuran, jika dibandingkan Sohail *et. al* (2020) yang juga mensintesis ZnO menggunakan ekstrak mimba, penelitiannya menghasilkan nilai PDI sekitar 0,383 maka nilai 0,201 yang diperoleh menunjukkan kualitas dispersi yang lebih baik dan stabil.

Keberhasilan sintesis nanopartikel zinc yang dilakukan, juga dikonfirmasi melalui terbentuknya ikatan gugus kimia yang terbentuk melalui uji FITR (Gambar 4.2). Pada hasil Uji FTIR ekstrak mimba, terdapat puncak lebar di panjang gelombang 3319 cm^{-1} menunjukkan vibrasi regangan NH_2 (amina) dan O–H (hidroksil) yang umumnya berasal dari senyawa fenolik, karboksil, dan alkohol yang terdapat dalam ekstrak mimba. Selain itu, pada sampel nanopartikel juga ditemukan adanya puncak di panjang gelombang 3319 cm^{-1} yang memiliki intensitas yang lebih rendah, jika dibandingkan dengan puncak dari ekstrak mimba.

Hal ini menunjukkan senyawa fenolik berperan dalam reduksi zinc sulfat membentuk partikel nano serta turut menyusun partikel *sebagai capping agent*.



Gambar 4.2 Perbandingan spektrum *Fourier Transform Infrared* (FTIR) dari ekstrak mimba, nanopartikel Zn, dan senyawa prekursor ZnSO₄ pada rentang bilangan gelombang 400–4000 cm⁻¹.

Penelitian yang dilakukan oleh Zambri *et. al* (2019) juga menunjukkan hal yang sama, dimana panjang gelombang 3324 yang lebar menunjukkan adanya gugus kimia NH₂ dan O–H yang tumpang tindih dan berasal dari senyawa kelompok fenol dari daun mimba, terjadinya tumpang tindih tersebut karena vibrasi O–H biasanya ditemukan di panjang gelombang 3350–3450 cm⁻¹, sedangkan NH₂ (amina) di antara 3200–3250 cm⁻¹ (Mecozzi & Sturchio 2017). Selain itu, Zambri *et. al* (2019) juga menemukan bahwa pada sampel nanopartikel yang diamati, vibrasi regangan O–H memiliki intensitas yang menurun, yang menandakan adanya proses reduksi dan terbentuknya capping agent.

Keberadaan gugus O–H tersebut sangat berbeda jika dibandingkan sampel Zn sulfat yang digunakan sebagai prekursor dalam penelitian ini, dimana tidak

adanya senyawa aromatik yang terkandung tetapi masih memiliki puncak khas pada 1165 dan 632 cm^{-1} yang menjadi ciri khas dari senyawa sulfat (Gambar 4.2). Lebih lanjut pada sampel nanopartikel juga terdapat puncak pada gelombang 611 cm^{-1} yang diperkirakan menjadi residu setelah proses reduksi nanopartikel. Penelitian Daou *et.al* (2017) juga menunjukkan hal yang sama bahwa setelah proses sintesis nanopartikel masih terdapat residu prekursor, seperti sulfat yang teramati pada panjang gelombang 630 cm^{-1} . Selain itu, Saha & Podder (2011) juga menambahkan, bahwa sulfat memiliki puncak khas, yakni 611 dan 1104 cm^{-1} .

keberadaan puncak lainnya yang paling penting ada pada daerah rendah pada gelombang 411 cm^{-1} merupakan ciri khas dari vibrasi ikatan logam-oksigen (Zn–O), yang secara langsung mengkonfirmasi terbentuknya nanopartikel ZnO. Hal ini sesuai dengan penelitian Al-Ariki *et. al* (2021), yang mana ZnO nanopartikel yang disintesis memiliki puncak panjang gelombang antara 400 and 467 cm^{-1} . Selain itu Tsegahun & Aklilu (2025) juga menemukan hal yang sama, bahwa ZnO-NP yang disintesis dikonfirmasi dengan adanya pack pada 544. Lebih lanjut Tsegahun & Aklilu (2025) menjelaskan bahwa panjang gelombang antara 400 dan 600 cm^{-1} mengkonfirmasi adanya vibrasi peregangan ikatan logam–oksigen. Dengan demikian, hasil FTIR ini memperkuat data PSA sebelumnya, bahwa nanopartikel zinc berhasil disintesis menggunakan ekstrak daun mimba.

4.2 Kandungan Prolin kedelai

Perlakuan cekaman kekeringan maupun aplikasi ZnO-NP pada penelitian ini didapati tidak memberikan pengaruh nyata terhadap kandungan prolin tanaman kedelai ($P > 0,05$). Hal ini ditunjukkan oleh hasil uji F yang menunjukkan bahwa faktor cekaman kekeringan (K), pemupukan (P), dan interaksi keduanya ($K \times P$)

bersifat tidak nyata (ns) (Tabel 4.1). Meskipun demikian, terdapat variasi nilai rata-rata kandungan prolin antar perlakuan yang dapat digunakan untuk menjelaskan respons fisiologis tanaman terhadap kondisi lingkungan yang diberikan.

Pada faktor cekaman kekeringan, kandungan prolin tertinggi diperoleh pada perlakuan K3 (50% kapasitas lapang) sebesar $5,81 \pm 0,37 \mu\text{mol g}^{-1}$, diikuti oleh K2 (75% kapasitas lapang) sebesar $5,80 \pm 0,17 \mu\text{mol g}^{-1}$, dan K1 (100% kapasitas lapang) sebesar $5,57 \pm 0,33 \mu\text{mol g}^{-1}$ (Tabel 4.1). Meskipun terdapat kecenderungan peningkatan kandungan prolin seiring dengan meningkatnya intensitas cekaman, perbedaan yang terjadi tidak signifikan secara statistik. Hal ini mengindikasikan bahwa tingkat cekaman yang diterapkan masih berada dalam kisaran toleransi tanaman kedelai, sehingga mekanisme adaptasi osmotik melalui akumulasi prolin belum terinduksi secara optimal.

Tabel 4.1 Pengaruh cekaman kekeringan & aplikasi ZnO-NP sintesis mimba terhadap kandungan prolin tanaman kedelai (rerata $\pm$ SE)

Faktor	Perlakuan	Prolin ($\mu\text{mol/ g}^{-1}$)
Faktor A: Cekaman Kekeringan (K)	K1: 100% KL	5.57 ± 0.33
	K2: 75% KL	5.80 ± 0.17
	K3: 50% KL	5.81 ± 0.37
Faktor B: Pemupukan (P)	P0: 0 ppm	5.70 ± 0.31
	P1: 100 ppm ZnO-NP	5.99 ± 0.44
	P2: 200 ppm ZnO-NP	5.41 ± 0.35
	P3: 300 ppm ZnO-NP	5.51 ± 0.32
	P4: 400 ppm ZnSO ₄	6.02 ± 0.50
Uji F	K	Ns
	P	Ns
	K $\times$ P	Ns

Keterangan simbol : ns (*non significant*) = tidak berbeda nyata ($P > 0,05$). * = berbeda nyata ($P < 0,05$).

Lebih lanjut, jika melihat kadar air gravimetrik media pada kondisi kapasitas lapang mencapai 72,4% kadar air yang masih tertahan setelah proses drainase gravitasi (Lampiran 5.C), hal ini menunjukkan bahwa media memiliki kemampuan retensi air yang tinggi, sehingga drainase air kurang baik dan menyebabkan cekaman kekeringan kurang berdampak. Menurut Murtalaksono & Wahyuni (2004), kadar air pada kapasitas lapang berkorelasi positif dengan kandungan liat dan mikropori tanah, dimana semakin tinggi kandungan liat maka semakin tinggi kadar air kapasitas lapang. Selain itu, Murtalaksono & Wahyuni (2004) juga menekankan bahwa tingginya kadar liat tersebut menyebabkan air terserap dan tidak terdrainase oleh gravitasi. Oleh karena itu, tingginya kadar air media pada penelitian ini mengindikasikan bahwa media tanam diduga memiliki fraksi liat yang relatif tinggi menyebabkan lonjakan kandungan prolin tidak terlalu signifikan .

Pada faktor pemberian pupuk, kandungan prolin tertinggi ditemukan pada perlakuan 100 ppm ZnO-NP sebesar $5,99 \pm 0,44 \mu\text{mol g}^{-1}$. Dibandingkan dengan kontrol (0 ppm) sebesar $5,70 \pm 0,31 \mu\text{mol g}^{-1}$, terdapat kecenderungan peningkatan kandungan prolin setelah aplikasi nanopartikel zinc oksida, meskipun perbedaan tersebut tidak signifikan secara statistik (Tabel 4.1). Menurut Hossain *et al.* (2019), kandungan prolin umumnya meningkat saat tanaman mengalami cekaman kekeringan sebagai bentuk adaptasi osmotik untuk mempertahankan turgor sel dan melindungi protein dari kerusakan.

Lebih lanjut, peningkatan dosis ZnO-NP justru diikuti penurunan kandungan prolin, dengan nilai terendah ditemukan pada dosis 200 ppm ($5,41 \pm 0,35 \mu\text{mol g}^{-1}$), kemudian sedikit meningkat kembali pada dosis 300 ppm ($5,51 \pm$

0,32 $\mu\text{mol g}^{-1}$), dan pada perlakuan 400 ppm ZnSO_4 sebesar $6,02 \pm 0,50 \mu\text{mol g}^{-1}$ (Tabel 4.1). Penurunan kandungan prolin pada dosis 200 ppm mengindikasikan bahwa nanopartikel ZnO mampu meredakan stres oksidatif melalui jalur non-osmolit. Hal ini dikonfirmasi oleh Shirvani-Naghani *et al.* (2024), yang melaporkan bahwa aplikasi foliar ZnO-NP pada dosis 200 ppm secara signifikan meningkatkan aktivitas enzim antioksidan seperti superoksida dismutase, katalase, dan peroksidase. Peningkatan aktivitas enzim-enzim tersebut membuat tanaman lebih efisien dalam menetralkan reactive oxygen species (ROS) akibat cekaman kekeringan, sehingga kebutuhan sintesis prolin sebagai osmoprotektan menjadi berkurang. Sebaliknya, pada dosis yang lebih tinggi (300 ppm ZnO-NP) maupun pada pupuk konvensional (400 ppm ZnSO_4), kandungan prolin yang relatif lebih tinggi mengindikasikan bahwa kapasitas enzim antioksidan tidak seefektif pada dosis optimal 200 ppm ZnO-NP dalam memitigasi stres lingkungan.

Perubahan kandungan prolin yang diamati dalam penelitian ini dapat dipandang sebagai bagian dari respons alami tanaman dalam menghadapi perubahan kondisi lingkungan. Fenomena tersebut dapat dikaji dalam perspektif firman Allah SWT pada QS. Al-Baqarah ayat 155:

وَلَنَبْلُوَنَّكُمْ بِشَيْءٍ مِّنَ الْخَوْفِ وَالْجُوعِ وَنَقْصٍ مِّنَ الْأَمْوَالِ وَالْأَنْفُسِ وَالثَّمَرَاتِ وَبَشِّرِ الصَّابِرِينَ

Artinya: “Kami pasti akan mengujimu dengan sedikit ketakutan dan kelaparan, kekurangan harta, jiwa, dan buah-buahan. Sampaikanlah (wahai Nabi Muhammad,) kabar gembira kepada orang-orang sabar” (QS. Al-Baqarah [2]: 155).

Menurut Tafsir Ibnu Katsir (2008), ayat tersebut menjelaskan bahwa Allah SWT menguji manusia dengan berbagai bentuk kesulitan dan keterbatasan sebagai bagian dari ketetapan-Nya dalam kehidupan. Ujian tersebut diberikan untuk

mengetahui keteguhan, kesabaran, dan kualitas keimanan manusia dalam menghadapi berbagai kondisi kehidupan. Allah SWT kemudian menjanjikan kabar gembira bagi mereka yang mampu bersabar ketika menghadapi ujian tersebut.

Sementara itu, Tafsir Al-Qurthubi (2006) menjelaskan bahwa ujian merupakan sunnatullah yang berlaku dalam kehidupan di dunia. Berbagai bentuk kesulitan yang dialami manusia mengandung hikmah untuk meningkatkan kesadaran, kesabaran, serta kemampuan mengambil pelajaran dari setiap peristiwa yang terjadi. Ujian tidak selalu dimaknai sebagai hukuman, melainkan sebagai bagian dari proses pembelajaran dan pendewasaan. Menurut Tafsir Al-Misbah (2002), ayat ini menunjukkan bahwa kehidupan dunia merupakan ruang pembelajaran yang tidak terlepas dari berbagai tantangan dan perubahan kondisi. Berbagai ujian yang dihadapi manusia menjadi sarana untuk membentuk keteguhan, kedewasaan, dan kemampuan dalam menghadapi realitas kehidupan.

Berdasarkan berbagai penafsiran tersebut, dapat dipahami bahwa kehidupan berlangsung dalam kondisi yang dinamis dan penuh tantangan. Prinsip tersebut dapat digunakan sebagai perspektif untuk memahami bahwa makhluk hidup senantiasa berinteraksi dengan lingkungan yang berubah-ubah sehingga memerlukan kemampuan adaptasi untuk mempertahankan kelangsungan hidupnya. Dalam ekosistem, berbagai faktor lingkungan seperti kekeringan, suhu ekstrem, dan keterbatasan unsur hara merupakan bagian dari dinamika alam yang dapat mempengaruhi proses fisiologis organisme (Zhang *et al.*, 2023).

Dalam penelitian ini, cekaman kekeringan merupakan faktor lingkungan yang berpotensi memengaruhi respons fisiologis tanaman kedelai. Kekurangan air dapat menyebabkan terganggunya berbagai proses metabolisme sehingga tanaman

perlu melakukan penyesuaian fisiologis untuk mempertahankan fungsi kehidupannya. Meskipun hasil penelitian menunjukkan bahwa perlakuan cekaman tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kandungan prolin, keberadaan mekanisme adaptasi seperti akumulasi prolin tetap menunjukkan bahwa tumbuhan memiliki kemampuan untuk merespons perubahan lingkungan yang dihadapinya.

Selain berkaitan dengan cekaman lingkungan, hasil penelitian ini juga menunjukkan adanya variasi respons tanaman terhadap perbedaan konsentrasi ZnO-NPs synthesis mimba yang diberikan. Variasi tersebut menunjukkan bahwa respons fisiologis tanaman dipengaruhi oleh berbagai faktor yang saling berinteraksi, termasuk kondisi lingkungan dan perlakuan yang diterima tanaman.

Kondisi tersebut dapat dipahami melalui firman Allah SWT dalam QS. Al-Qamar ayat 49:

إِنَّا كُلَّ شَيْءٍ خَلَقْنَاهُ بِقَدَرٍ

Artinya: *"Sesungguhnya Kami menciptakan segala sesuatu menurut ukuran."* (QS. Al-Qamar [54]: 49).

Menurut Tafsir Ibnu Katsir (2008), ayat tersebut menjelaskan bahwa segala sesuatu yang ada di alam semesta diciptakan Allah SWT berdasarkan ukuran, ketentuan, dan hikmah yang telah ditetapkan-Nya. Tidak ada sesuatu yang terjadi secara kebetulan karena seluruh ciptaan berada dalam ketentuan Allah SWT. Dalam Tafsir Al-Muyassar (2011) dijelaskan bahwa seluruh makhluk dan peristiwa yang terjadi di alam semesta berlangsung sesuai takdir dan ukuran yang telah Allah SWT tentukan. Sementara itu, Tafsir Al-Misbah (2002) menjelaskan bahwa konsep *bi qadar* menunjukkan adanya keteraturan hukum-hukum alam yang memungkinkan

manusia memahami berbagai fenomena kehidupan melalui pengamatan dan ilmu pengetahuan. Berdasarkan ketiga penafsiran tersebut, dapat dipahami bahwa alam semesta berlangsung dalam suatu sistem yang teratur dan mengikuti hukum-hukum tertentu yang telah ditetapkan Allah SWT.

Keseimbangan merupakan prinsip penting dalam kehidupan, termasuk dalam proses fisiologi tanaman. Pemberian unsur hara pada dosis yang terlalu rendah dapat menyebabkan kebutuhan nutrisi tanaman tidak terpenuhi, sedangkan pemberian yang berlebihan juga berpotensi mengganggu keseimbangan metabolisme dan menurunkan efisiensi pemanfaatan unsur hara. Pada penelitian ini, variasi kandungan prolin pada berbagai kadar atau takaran cekaman kekeringan dan konsentrasi ZnO-NPs menunjukkan bahwa respons tanaman tidak terjadi secara acak, melainkan dipengaruhi oleh berbagai faktor biologis dan lingkungan yang bekerja secara kompleks. Meskipun perbedaan yang diperoleh tidak signifikan secara statistik, hasil penelitian ini memberikan gambaran bahwa respons tanaman terhadap suatu perlakuan berlangsung melalui mekanisme fisiologis tertentu yang mengikuti karakteristik dan kebutuhan tanaman. Oleh karena itu, diperlukan kemampuan berpikir dan pertimbangan yang matang dalam menentukan perlakuan yang tepat agar diperoleh hasil yang optimal.

Pemahaman mengenai pentingnya petunjuk dan pengetahuan dalam mengenali keteraturan alam juga tercermin dalam firman Allah SWT pada QS. Ghafir ayat 53-54:

وَلَقَدْ آتَيْنَا مُوسَى الْهُدَى وَأَوْرَثْنَا بَنِي إِسْرَءِيلَ الْكِتَابَ هُدىً وَذِكْرَى لَأُولَى الْأَلْبَابِ

Artinya: “*Sungguh, Kami benar-benar telah menganugerahkan petunjuk kepada Musa dan mewariskan Kitab (Taurat) kepada Bani Israil untuk menjadi*

petunjuk dan peringatan bagi orang-orang yang berpikiran sehat.” (QS. Ghafir [40]: 53-54).

Menurut Tafsir Ibnu Katsir (2008), ayat tersebut menjelaskan bahwa Allah SWT memberikan petunjuk kepada Nabi Musa AS dan menjadikan kitab yang diwariskan kepada Bani Israil sebagai pedoman bagi manusia dalam membedakan kebenaran dan kebatilan agar manusia mampu mengambil pelajaran dari tanda-tanda kebesaran-Nya yang terdapat di alam semesta. Tafsir Al-Muyassar (2011) menjelaskan bahwa kitab yang diturunkan Allah SWT mengandung petunjuk dan pelajaran yang dapat dimanfaatkan oleh orang-orang yang menggunakan akalanya untuk memahami tanda-tanda kebesaran-Nya. Sementara itu, Quraish Shihab dalam Tafsir Al-Misbah (2002) menjelaskan bahwa bahwa *ulul albab* merupakan kelompok manusia yang tidak hanya memiliki kemampuan berpikir, tetapi juga mampu mengambil pelajaran dari berbagai fenomena yang terjadi di sekitarnya. Berdasarkan ketiga penafsiran tersebut, dapat dipahami bahwa Allah SWT mendorong manusia untuk menggunakan akal dan pengetahuannya dalam memahami berbagai tanda serta fenomena yang terdapat di alam semesta.

Sikap *ulul albab* dalam penelitian ini tercermin pada upaya menentukan dosis ZnO-NP yang paling sesuai bagi tanaman. Aktivitas penelitian dapat dipandang sebagai salah satu bentuk pemanfaatan akal dalam memahami fenomena alam yang telah Allah SWT ciptakan. Lebih lanjut, Hal tersebut selaras dengan perspektif Pohon Keilmuan UIN Maulana Malik Ibrahim Malang, yang pada dasarnya merupakan bagian dari proses pembentukan buah. Buah tersebut adalah terwujudnya insan *Ulul Albab* sosok yang mampu memadukan kemampuan berpikir ilmiah (*fikr*) dengan kesadaran spiritual (*dzikr*). Untuk sampai pada buah tersebut, penelitian ini terlebih dahulu bertumpu pada akar berupa kemampuan

literasi ilmiah dan berpikir kritis, kemudian tumbuh melalui batang agama sebagai landasan dalam menilai manfaat dan muddorrot, dan berkembang pada cabang disiplin biologi khususnya biokimia tanaman dan nanoteknologi hijau. Dengan demikian, kegiatan mengamati respons prolin kedelai terhadap cekaman kekeringan dan aplikasi ZnO-NP dalam penelitian ini bukan sekadar aktivitas ilmiah semata, melainkan merupakan wujud nyata dari sikap *Ulul Albab* sebagaimana yang dituju oleh QS. Ghafir [40]: 53-54, yaitu menggunakan ilmu pengetahuan sebagai sarana untuk mengenali tanda-tanda kebesaran Allah SWT khususnya dari fenomena-fenomena alam yang terjadi.

Pandangan mengenai pentingnya pengamatan terhadap fenomena alam juga tercermin dalam pemikiran Ibn al-Awwam, seorang ilmuwan pertanian Muslim dari Andalusia yang menulis kitab *Kitab al-Filaha*. Menurut Khuluq & Lahuri (2020), kitab tersebut menjelaskan berbagai aspek budidaya tanaman, termasuk pengelolaan tanah, irigasi, pemupukan, serta faktor-faktor lingkungan yang mempengaruhi pertumbuhan tanaman. Ia menekankan pentingnya pengamatan terhadap kondisi tanaman dan lingkungan sebagai dasar dalam pengambilan keputusan budidaya. Karyanya juga menunjukkan bahwa pemahaman mengenai respons tanaman terhadap berbagai kondisi lingkungan merupakan bagian penting dalam pengembangan ilmu pertanian. Oleh karena itu, penelitian ini yang mengkaji respons fisiologis tanaman kedelai terhadap cekaman kekeringan dan aplikasi ZnO-NPs sintesis mimba melalui pengukuran kandungan prolin dapat dipandang sejalan dengan semangat pengamatan dan pengkajian ilmiah terhadap fenomena pertanian yang telah berkembang dalam tradisi keilmuan Islam.

Upaya untuk memahami respons tanaman terhadap cekaman lingkungan serta mengeksplorasi pemanfaatan ZnO-NP sintesis mimba sebagai perlakuan pada tanaman merupakan salah satu bentuk ikhtiar manusia dalam mengembangkan ilmu pengetahuan untuk mendukung sektor pertanian. Hal tersebut sejalan dengan hadis Rasulullah SAW:

حَدَّثَنَا أَبُو الْوَلِيدِ، قَالَ: حَدَّثَنَا حَمَّادُ بْنُ سَلَمَةَ، عَنْ هِشَامِ بْنِ زَيْدٍ، عَنْ أَنَسِ بْنِ مَالِكٍ، عَنْ أَنَسِ بْنِ مَالِكٍ، عَنِ النَّبِيِّ صَلَّى اللَّهُ عَلَيْهِ وَسَلَّمَ قَالَ: إِنْ قَامَتِ السَّاعَةُ وَبَيَدِ أَحَدِكُمْ فَسِيلَةٌ، فَإِنْ اسْتَطَاعَ أَنْ لَا تَقُومَ حَتَّى يَغْرِسَهَا فَلْيَغْرِسْهَا (رواه أحمد).

Artinya: “Telah menceritakan kepada kami Abu Al-Walid, ia berkata: Telah menceritakan kepada kami Hammad bin Salamah, dari Hisyam bin Zaid bin Anas bin Malik, dari Anas bin Malik, dari Nabi shallallahu 'alaihi wa sallam, beliau bersabda: 'Jika hari kiamat telah mulai terjadi, sedangkan di tangan salah seorang di antara kalian ada tunas pohon kurma, maka jika ia mampu untuk tidak berdiri (kiamat tidak mendahuluinya) sampai ia sempat menanamnya, maka hendaklah ia tetap menanamnya.'”. (HR. Ahmad).

Hadis tersebut mengajarkan pentingnya sikap produktif dan upaya yang berkelanjutan dalam memberikan manfaat bagi kehidupan. Dalam konteks penelitian ini, kegiatan penelitian dan pengembangan teknologi pertanian dapat dipandang sebagai bentuk ikhtiar ilmiah untuk meningkatkan pemahaman mengenai respons tanaman terhadap lingkungan serta mendukung pengelolaan pertanian yang lebih baik di masa mendatang.

Berdasarkan uraian tersebut, hasil penelitian ini dapat dipahami dalam perspektif Al-Qur'an dan Hadits sebagai bagian dari upaya manusia untuk mempelajari berbagai mekanisme yang terjadi pada makhluk hidup. Cekaman kekeringan, response fisiologis tanaman, serta variasi respons terhadap aplikasi ZnO-NP dapat dipandang sejalan dengan konsep ujian kehidupan dan keteraturan alam yang dijelaskan dalam Al-Qur'an. Sementara itu, kegiatan penelitian dan

pengembangan ilmu pengetahuan merupakan bentuk ikhtiar yang dapat memberikan manfaat bagi keberlanjutan sektor pertanian dan kehidupan manusia.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Nanopartikel Zn-O berhasil disintesis menggunakan bioreduktor *A.indica* dengan karakteristik ukuran rata-rata 112 nm.
2. Cekaman kekeringan tidak mempengaruhi kandungan prolin tanaman kedelai secara signifikan
3. Aplikasi Nanopartikel zinc sintesis mimba (*Azadirachta indica*) tidak memiliki pengaruh yang signifikan, tetapi berdasarkan rata rata, ZnO-NP 100 ppm memiliki kandungan protein tertinggi dan 200 ppm diketahui menurunkan kadar prolin
4. Pengaruh kombinasi cekaman kekeringan dan aplikasi nanopartikel zink tidak memiliki hubungan yang signifikan.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian ini, nanopartikel ZnO dapat disintesis secara ramah lingkungan menggunakan ekstrak daun mimba (*Azadirachta indica*) sebagai bioreduktor, sehingga pendekatan biosintesis ini berpotensi menjadi alternatif metode sintesis kimia yang lebih efisien dan berkelanjutan. Meskipun aplikasi ZnO-NP pada penelitian ini belum menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap kandungan prolin tanaman kedelai di bawah cekaman kekeringan, hasil penelitian memberikan informasi dasar yang penting mengenai respons fisiologis tanaman

terhadap kombinasi kedua faktor tersebut. Pada akhirnya penentuan jenis tanah penting untuk pertimbangan agar cekaman kekeringan dapat disiumlasikan dengan lebih baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Akar Sible, C., & Below, F. (2023). Role of Biologicals in Enhancing Nutrient Efficiency in Corn and Soybean. *Crops & Soils*, 56(2), 13-19.
- Alabdallah, N. M., Hasan, M. M., Hammami, I., Alghamdi, A. I., Alshehri, D., & Alatawi, H. A. (2021). Green synthesized metal oxide nanoparticles mediate growth regulation and physiology of crop plants under drought stress. *Plants*, 10(8), 1730.
- Al-Ariki, S., Yahya, N. A., Al-A'nsi, S. A. A., Jumali, M. H., Jannah, A. N., & Abd-Shukor, R. (2021). Synthesis and comparative study on the structural and optical properties of ZnO doped with Ni and Ag nanopowders fabricated by sol gel technique. *Scientific Reports*, 11(1), 11948.
- Al-Bugha, Musthafa Dib & Al-Syarif, Muhammad. (2007). *Syarh Riyâdhush Shâlihîn*. Jilid 1, hlm. 342–343. Beirut: Dar al-Salam
- Al-Bukhari, Muhammad bin Ismail. (2002). *Shahih al-Bukhari*. (Kitab al-Muzāra'ah, Bab Faḍl az-Zar' wal-Ghars, No. 2320). Riyadh: Darus Salam.
- Al-Muyassar. (2011). *Tafsir Al-Muyassar*. Riyadh: Mujamma' Malik Fahd li Thiba'at al-Mushaf asy-Syarif.
- Al-Qurthubi. (2006). *Tafsir Al-Qurthubi*. Pustaka Azzam.
- An-Nawawi, Yahya bin Syaraf. (t.t.). *Syarh Shahih Muslim*. Juz 10, hlm. 164–165. Beirut: Dar al-Kutub al-'Ilmiyyah.
- Balusamy, S. R., Joshi, A. S., Perumalsamy, H., Mijakovic, I., & Singh, P. (2023). Advancing sustainable agriculture: a critical review of smart and eco-friendly nanomaterial applications. *Journal of Nanobiotechnology*, 21(1), 372.
- Nazaruddin, M., & Irmayanti, I. (2020). Tingkat pertumbuhan dan produksi tanaman kedelai pada berbagai jarak tanam dan konsentrasi giberelin. *Jurnal Agrium*, 17(1).
- Renzetti, M., Funck, D., & Trovato, M. (2025). Proline and ROS: A Unified Mechanism in Plant Development and Stress Response? *Plants*, 14(1), 2.
- Tănase, M. A., Marinescu, M., Oancea, P., Răducan, A., Mihaescu, C. I., Alexandrescu, E., Nistor, C. L., Jinga, L.-I., Dițu, L. M., Petcu, C., & Cinteza, L. O. (2021). Antibacterial and Photocatalytic Properties of ZnO Nanoparticles Obtained from Chemical versus *Saponaria officinalis* Extract-Mediated Synthesis. *Molecules*, 26(7), 2072.
- Benitez-Salazar, M. I., Nino-Castano, V. E., Duenas-Cuellar, R. A., Caldas-Arias, L., Fernandez, I., & Rodríguez-Páez, J. E. (2021). Chemical synthesis versus green synthesis to obtain ZnO powders: Evaluation of the antibacterial capacity of the nanoparticles obtained by the chemical method. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(6), 106544.
- Bashir, S. S., Hussain, A., Hussain, S. J., Wani, O. A., Zahid Nabi, S., Dar, N. A., ... & Mansoor, S. (2021). Plant drought stress tolerance: Understanding its physiological, biochemical and molecular mechanisms. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, 35(1), 1912-1925.
- Bates, L. S., Waldren, R. P. A., & Teare, I. D. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and soil*, 39(1), 205-207.

- Beckman Coulter, Inc. (2017). *DelsaMax PRO Light Scattering Analyzer Instructions for Use* (Publication No. B23930AB). Beckman Coulter, Inc.
- Bhijet. (2024). *Neem tree growing in banana plantation* [Fotografi]. Useful Tropical Plants. Diakses pada 9 Oktober 2025, dari <https://tropical.theferns.info/image.php?id=Azadirachta+indica>
- Bhuyan, T., Mishra, K., Khanuja, M., Prasad, R., & Varma, A. (2015). Biosynthesis of zinc oxide nanoparticles from *Azadirachta indica* for antibacterial and photocatalytic applications. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 32, 55-61.
- Birnboim, H. C., & Doly, J. (1979). A rapid alkaline extraction procedure for screening recombinant plasmid DNA. *Nucleic Acids Research*, 7(6), 1513–1523.
- Ciesla, W. M. (2024). *Foliage and fruits of Azadirachta indica* [Fotografi]. Forest Health Management International, Bugwood.org. . Diakses pada 9 Oktober 2025, dari
- Daou, I., Zegaoui, O., & Elghazouani, A. (2017). Physicochemical and photocatalytic properties of the ZnO particles synthesized by two different methods using three different precursors. *Comptes Rendus. Chimie*, 20(1), 47-54.
- De Souza, P. I., Egli, D. B., & Bruening, W. P. (1997). Water stress during seed filling and leaf senescence in soybean. *Agronomy Journal*, 89(5), 807-812.
- Dola, D. B., & Mannan, M. A. (2022). Foliar application effects of zinc oxide nanoparticles on growth, yield and drought tolerance of soybean. *Bangladesh Agronomy Journal*, 25(2), 73-82.
- Dola, D. B., & Mannan, M. A. (2022). Foliar application effects of zinc oxide nanoparticles on growth, yield and drought tolerance of soybean. *Bangladesh Agronomy Journal*, 25(2), 73-82.
- Dornbos Jr, D. L., & Mullen, R. E. (1992). Soybean seed protein and oil contents and fatty acid composition adjustments by drought and temperature. *Journal of the American Oil Chemists Society*, 69(3), 228-231.
- Du, Y., Zhao, Q., Chen, L., Yao, X., & Xie, F. (2020). Effect of drought stress at reproductive stages on growth and nitrogen metabolism in soybean. *Agronomy*, 10(2), 302.
- Filippov, S. K., Khusnutdinov, R., Murmiliuk, A., Inam, W., Zakharova, L. Y., Zhang, H., & Khutoryanskiy, V. V. (2023). Dynamic light scattering and transmission electron microscopy in drug delivery: a roadmap for correct characterization of nanoparticles and interpretation of results. *Materials horizons*, 10(12), 5354-5370.
- Fukutoku, Y., & Yamada, Y. (1981). Sources of proline-nitrogen in water-stressed soybean (*Glycine max* L.) I. Protein metabolism and proline accumulation. *Plant and Cell Physiology*, 22(8), 1387-1404.
- Gulo, D. K., & Nurhayati, N. (2023). Proses fisiologis pembentukan protein kedelai pada Kondisi tanaman mengalami stres kekeringan. *Tabela Jurnal Pertanian Berkelanjutan*, 1(1), 15-18.

- Hassan, U. M., Aamer, M., Umer Chattha, M., Haiying, T., Shahzad, B., Barbanti, L., ... & Guoqin, H. (2020). The critical role of zinc in plants facing the drought stress. *Agriculture*, 10(9), 396.
- Heuer, B. (2010). Role of proline in plant response to drought and salinity. *Handbook of plant and crop stress*, 3, 213-238.
- Hong, J., Wang, C., Wagner, D. C., Gardea-Torresdey, J. L., He, F., & Rico, C. M. (2021). Foliar application of nanoparticles: mechanisms of absorption, transfer, and multiple impacts. *Environmental Science: Nano*, 8(5), 1196-1210.
- Hossain, M. A., Kumar, V., Burritt, D. J., Fujita, M., & Mäkelä, P. (2019). Osmoprotectant-mediated abiotic stress tolerance in plants. *Proline Metabolism and Its Functions in Development and Stress Tolerance*; Springer Nature: Cham, Switzerland, 41-72.
- Ibn Hanbal, A. (2001). *Musnad al-Imam Ahmad bin Hanbal*. Jilid 21. Editor: Syu'aib Al-Arnauth. Muassasatur Risalah.
- Ibnu Hajar al-'Asqalani. (1379 H). *Fath al-Bari Syarh Shahih al-Bukhari*. Juz 5, hlm. 5–6. Beirut: Dar al-Ma'rifah.
- Ibnu Katsir. (2008). *Tafsir Ibnu Katsir* (Terj. M. Abdul Ghoffar). Jakarta: Pustaka Imam Asy-Syafi'i.
- Ibrahim, W., Muhlisin, M., Zuprizal, Z., & Martien, R. (2025). Green synthesis and characterization of zinc nanoparticles using *Azadirachta indica* extract. *Indonesian Journal of Pharmacy*, 36(2), 286–298
- Imakumbili, M.L. (2019) *Making Water Stress Treatments in Pot Experiments: An Illustrated Step-by-Step Guide*; Sokoine University of Agriculture: Morogora, Tanzania; pp. 1–17.
- J.P. Selecta S.A.U. (2020). *Manual de Instrucciones: Destilador Kjeldahl Automático PRO-NITRO A (Código 80189 Rev E)*. Barcelona, España: J.P. Selecta S.A.U.
- Kamdi, T. S., Rajput, H. J., Bhalerao, B. M., & Kadam, L. S. (2026). Green synthesis of zinc oxide nanoparticles using leaf extract of neem (*Azadirachta indica* L.) and their characterization. *International Journal of Advanced Biochemistry Research*, 10(1), 1075-1079.
- Kementerian Pertanian Republik Indonesia. (2024). *Buku analisis ketersediaan dan kebutuhan komoditas pertanian tahun 2024*. Satu Data Pertanian. Diakses pada 10 Oktober 2025
- Kevinsooryan. (2024). *Leaves and fruits* [Fotografi]. Useful Tropical Plants. Diakses pada 9 Oktober 2025, dari <https://tropical.theferns.info/image.php?id=Azadirachta+indica>
- Khuluq, V. H., & Lahuri, S. B. (2020). Perkembangan Pertanian Dalam Peradaban Islam: Sebuah Telaah Historis Kitab Al Filaha Ibnu Awwam. *Tamaddun: Jurnal Sejarah dan Kebudayaan Islam*, 8(1).
- Krisnawati, A., & Adie, M. M. (2017). Protein and oil contents of several soybean genotypes under normal and drought stress environments at reproductive stage. *International Journal of Bioscience, Biochemistry and Bioinformatics*, 7(4), 252-261.

- Lee, K. T., Liao, H. S., & Hsieh, M. H. (2023). Glutamine metabolism, sensing and signaling in plants. *Plant and Cell Physiology*, 64(12), 1466-1481.
- Lemes, E. M., & Catão, H. C. R. M. (2024). Soybean seed Coat cracks and Green seeds—predisposing conditions, identification and management. *Seeds*, 3(1), 133-148.
- Liu, R., & Lal, R. (2015). Potentials of engineered nanoparticles as fertilizers for increasing agronomic productions. *Science of the total environment*, 514, 131-139.
- Mangena, P. (2018). Water stress: morphological and anatomical changes in soybean (*Glycine max* L.) plants. *Plant, abiotic stress and responses to climate change*, 9-31.
- Mecozzi, M., & Sturchio, E. (2017). Computer assisted examination of infrared and near infrared spectra to assess structural and molecular changes in biological samples exposed to pollutants: a case of study. *Journal of Imaging*, 3(1), 11.
- Medic, J., Atkinson, C., & Hurburgh Jr, C. R. (2014). Current knowledge in soybean composition. *Journal of the American oil chemists' society*, 91(3), 363-384.
- Mohammadkhani, N., & Heidari, R. (2008). Drought-induced accumulation of soluble sugars and proline in two maize varieties. *World Appl. Sci. J*, 3(3), 448-453.
- Mohanasundaram, P., & Saral A, M. (2025). Binding properties and biological applications of green synthesized ZnO nanoparticles from neem flower. *Scientific Reports*, 15(1), 17727.
- Muliani, Y., Yustiano, A., Ustari, D., Irmawatie, L., & Azzahra, A. N. (2025). Respon Simbiosis Rhizobium Japonicum Kirchner dengan Perakaran Tanaman Kedelai (*Glycine max* (L.) Merrill) terhadap Aplikasi *Pseudomonas fluorescens* Migula. AGROSCRIPT: *Journal of Applied Agricultural Sciences*, 7(1), 86-96.
- Muslim, Ibn al-Hajjaj. (2003). *Shahih Muslim*. (Kitab al-Muzāra‘ah, No. 1553). Beirut: Dar al-Kutub al-‘Ilmiyyah.
- Nath, D., & Banerjee, P. (2013). Green nanotechnology—a new hope for medical biology. *Environmental toxicology and pharmacology*, 36(3), 997-1014.
- Nikolaeva, M. K., Maevskaya, S. N., Shugaev, A. G., & Bukhov, N. G. (2010). Effect of drought on chlorophyll content and antioxidant enzyme activities in leaves of three wheat cultivars varying in productivity. *Russian Journal of Plant Physiology*, 57(1), 87-95.
- Oufir, M., Schulz, N., Vallikhan, P. S. S., Wilhelm, E., Burg, K., Hausman, J. F., ... & Guignard, C. (2009). Simultaneous measurement of proline and related compounds in oak leaves by high-performance ligand-exchange chromatography and electrospray ionization mass spectrometry for environmental stress studies. *Journal of Chromatography A*, 1216(7), 1094-1099.
- Palash9. (2024). *Flowers and leaves* [Fotografi]. Useful Tropical Plants. Diakses pada 9 Oktober 2025, dari <https://tropical.theferns.info/image.php?id=Azadirachta+indica>

- Pawlowski, M. L., Helfenstein, J., Frossard, E., & Hartman, G. L. (2019). Boron and zinc deficiencies and toxicities and their interactions with other nutrients in soybean roots, leaves, and seeds. *Journal of Plant Nutrition*, 42(6), 634-649.
- Pessarakli, M. (Ed.). (2014). Handbook of plant and crop physiology. CRC press.
- Piper, E. L., & Boote, K. I. (1999). Temperature and cultivar effects on soybean seed oil and protein concentrations. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 76(10), 1233-1241.
- Poehlsen, E. (2024). *Branches and canopy of an old neem tree* [Fotografi]. Useful Tropical Plants. Diakses pada 9 Oktober 2025, dari <https://tropical.theferns.info/image.php?id=Azadirachta+indica>
- Qiao, M., Hong, C., Jiao, Y., Hou, S., & Gao, H. (2024). Impacts of drought on photosynthesis in major food crops and the related mechanisms of plant responses to drought. *Plants*, 13(13), 1808.
- Quraish Shihab. (2002). *Tafsir Al-Misbah: Pesan, Kesan, dan Keserasian Al-Qur'an*. Lentera Hati.
- Rathore, J. S., & Mohit, U. (2013). Investigation of zinc concentration in some medicinal plant leaves. *Research Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2(1), 15-17.
- Rawat, M., Nayan, R., Negi, B., Zaidi, M. G. H., & Arora, S. (2017). Physio-biochemical basis of iron-sulfide nanoparticle induced growth and seed yield enhancement in *B. juncea*. *Plant Physiology and Biochemistry*, 118, 274-284.
- Rulkens, T. (2024). *Close-up of a flower* [Fotografi]. Useful Tropical Plants. Diakses pada 9 Oktober 2025, dari <https://tropical.theferns.info/image.php?id=Azadirachta+indica>
- Saha, J. K., & Podder, J. (2011). Crystallization of zinc sulphate single crystals and its structural, thermal and optical characterization. *Journal of Bangladesh Academy of Sciences*, 35(2), 203-210.
- Salih, A. M., Al-Qurainy, F., Khan, S., Tarroum, M., Nadeem, M., Shaikhaldein, H. O., ... & Alfarradj, N. S. (2021). Biosynthesis of zinc oxide nanoparticles using *Phoenix dactylifera* and their effect on biomass and phytochemical compounds in *Juniperus procera*. *Scientific reports*, 11(1), 19136.
- Sánchez-Pérez, D. M., Flores-Loyola, E., Márquez-Guerrero, S. Y., Galindo-Guzman, M., & Marszalek, J. E. (2023). Green synthesis and characterization of zinc oxide nanoparticles using *Larrea tridentata* extract and their impact on the in-vitro germination and seedling growth of *Capsicum annuum*. *Sustainability*, 15(4), 3080.
- Sanjeev, N. O., Valsan, A. E., Zachariah, S., & Vasu, S. T. (2023). Synthesis of zinc oxide nanoparticles from *Azadirachta indica* extract: a sustainable and cost-effective material for wastewater treatment. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 27(4), 04023027.
- Sarkar, S., Singh, R. P., & Bhattacharya, G. (2021). Exploring the role of *Azadirachta indica* (neem) and its active compounds in the regulation of biological pathways: an update on molecular approach. *Biotech*, 11(4), 178.

- Semenova, N. A., Burmistrov, D. E., Shumeyko, S. A., & Gudkov, S. V. (2024). Fertilizers based on nanoparticles as sources of macro-and microelements for plant crop growth: *A review. Agronomy*, 14(8), 1646.
- Semida, W. M., Abdelkhalik, A., Mohamed, G. F., Abd El-Mageed, T. A., Abd El-Mageed, S. A., Rady, M. M., & Ali, E. F. (2021). Foliar application of zinc oxide nanoparticles promotes drought stress tolerance in eggplant (*Solanum melongena* L.). *Plants*, 10(2), 421.
- Shihab, M. Quraish. (2002). *Tafsir Al-Misbah: Pesan, Kesan dan Keserasian Al-Qur'an* (Vol. 9). Jakarta: Lentera Hati
- Shirvani-Naghani-Naghani, S., Fallah, S., Pokhrel, L. R., & Rostamnejadi, A. (2024). Drought stress mitigation and improved yield in *Glycine max* through foliar application of zinc oxide nanoparticles. *Scientific Reports*, 14(1), 27898.
- Singh, A. K., Pal, P., Gupta, V., Yadav, T. P., Gupta, V., & Singh, S. P. (2018). Green synthesis, characterization and antimicrobial activity of zinc oxide quantum dots using *Eclipta alba*. *Materials Chemistry and Physics*, 203, 40-48.
- Singh, H., Desimone, M. F., Pandya, S., Jasani, S., George, N., Adnan, M., ... & Alderhami, S. A. (2023). Revisiting the green synthesis of nanoparticles: uncovering influences of plant extracts as reducing agents for enhanced synthesis efficiency and its biomedical applications. *International journal of nanomedicine*, 4727-4750.
- Singh, R. J., Nelson, R. L., & Chung, G. (2006). Soybean (*Glycine max* (L.) Merr.). Genetic resources, chromosome engineering, and crop improvement. *Oil seed crops*, 4, 13-50.
- Sohail, M. F., Rehman, M., Hussain, S. Z., Huma, Z. E., Shahnaz, G., Qureshi, O. S., ... & Webster, T. J. (2020). Green synthesis of zinc oxide nanoparticles by Neem extract as multi-facet therapeutic agents. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 59, 101911.
- Streeter, J. G. (2003). Effects of drought on nitrogen fixation in soybean root nodules. *Plant, Cell & Environment*, 26(8), 1199-1204.
- Sy, S. R. C., & Djauhari, S. (2012). *Seed Pathology: Penyakit Benih*. Universitas Brawijaya Press..
- Szabados, L., & Saviouré, A. (2010). Proline: A multifunctional amino acid. *Trends in Plant Science*, 15(2), 89–97.
- Takahashi, F., Kuromori, T., Urano, K., Yamaguchi-Shinozaki, K., & Shinozaki, K. (2020). Drought stress responses and resistance in plants: from cellular responses to long-distance intercellular communication. *Frontiers in plant science*, 11, 556972.
- Thiex, N. J., Anderson, S., Gildemeister, B., & Collaborators: Adcock W Boedigheimer J Bogren E Coffin R Conway K DeBaker A Frankenius E Gramse M Hogan P Knese T MacDonald JM Iler J Royle R Russell M Shafiee F Shreve B Sieh J Spann M Töpler E Watts M. (2003). Crude fat, hexanes extraction, in feed, cereal grain, and forage (Randall/Soxtec/submersion method): collaborative study. *Journal of AOAC International*, 86(5), 899-908.

- Timotiwu, P. B., Nurmiaty, N., Pramono, E., & Maysaroh, S. (2020). Growth and yield responses of four soybean (*Glycine max* (L.) Merrill.) cultivars to different methods of NPK fertilizer application. *Planta Tropika: Jurnal Agrosains (Journal of Agro Science)*, 8(1), 39-43.
- Tsegahun, E., & Aklilu, M. (2025). Neem (*Azadirachta indica*) leaf extract mediated synthesis of zinc oxide nanoparticles (ZnO NPs) and their antibacterial activity. *Discover Nano*, 20(1), 145.
- Uzzaman, S. (2020). Pharmacological activities of neem (*Azadirachta indica*): A review. *Int. J. Pharmacogn. Life Sci*, 1(1), 38-41.
- Verma, K. K., Song, X. P., Degu, H. D., Guo, D. J., Joshi, A., Huang, H. R., ... & Li, Y. R. (2023). Recent advances in nitrogen and nano-nitrogen fertilizers for sustainable crop production: a mini-review. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 10(1), 111.
- Vishwakarma, M., Kulhare, P. S., & Tagore, G. S. (2023). Estimation of chlorophyll using SPAD meter. *International Journal of Environment and Climate Change*, 13(11), 1901-1912.
- Wang, X., Wu, Z., Zhou, Q., Wang, X., Song, S., & Dong, S. (2022). Physiological response of soybean plants to water deficit. *Frontiers in Plant Science*, 12, 809692.
- Wang, Z., Wang, S., Ma, T., Liang, Y., Huo, Z., & Yang, F. (2023). Synthesis of zinc oxide nanoparticles and their applications in enhancing plant stress resistance: A review. *Agronomy*, 13(12), 3060.
- Wei, Y., Jin, J., Jiang, S., Ning, S., & Liu, L. (2018). Quantitative response of soybean development and yield to drought stress during different growth stages in the Huaibei Plain, China. *Agronomy*, 8(7), 97.
- Winter, R. (2019). *Shimadzu FT-IR Affinity operating procedure* (Revision No. 1). Rochester Institute of Technology, Department of Chemistry and Material Science.
- Yasari, E., & Vahedi, A. (2012). Micronutrients impact on soybean (*Glycine max* (Merrill)) qualitative and quantitative traits. *International Journal of Biology*, 4(2), 112
- Zambri, N. D. S., Taib, N. I., Abdul Latif, F., & Mohamed, Z. (2019). Utilization of neem leaf extract on biosynthesis of iron oxide nanoparticles. *Molecules*, 24(20), 3803.
- Zhang, Y., Xu, J., Li, R., Ge, Y., Li, Y., & Li, R. (2023). Plants' Response to Abiotic Stress: Mechanisms and Strategies. *International journal of molecular sciences*, 24(13), 10915. <https://doi.org/10.3390/ijms241310915>
- Zin, P. M. M. & Oo, K. C. C. (2020). Study on the morphological characters of *Azadirachta indica* A. Juss. *Myanmar Korea Conference Research Journal* Volume 3, No. 2

LAMPIRAN

Lampiran 1 Perhitungan $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ untuk sintesis nanopartikel

Diketahui:

- Senyawa : Zinc sulfate heptahydrate ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)
- Konsentrasi akhir : 0,05 M
- Volume larutan : 100 mL

$$m = M \times V \times Mr$$

$$m = 0,05 \times 0,1 \times 287,45 \qquad m = 1,43725 \text{ g}$$

Hasil

Massa Zinc sulfate heptahydrate yang dibutuhkan untuk membuat larutan 0,05 M sebanyak 100 mL adalah:

$$1,44 \text{ gram}$$

Lampiran 2 Hasil PSA

Dokumentasi hasil PSA



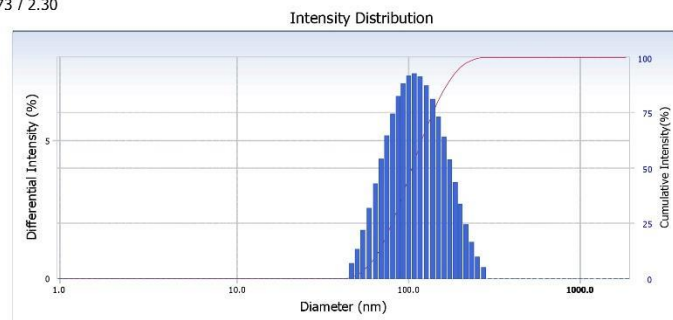
Delsa™ Nano
Common

Intensity Distribution

S/N : 142812

User : Common	Group : GEL	Repetition : 1/3
Date : 3/17/2026	File Name : AI 170326	
Time : 01:24:44	Sample Information : AI 170326	
SOP Name : Gel	Security : No Security	

Version 3.73 / 2.30



Distribution Results (Contin)

Peak	Diameter (nm)	Std. Dev.
1	122.3	46.5
2	0.0	0.0
3	0.0	0.0
4	0.0	0.0
5	0.0	0.0
Average	122.3	46.5
Residual :	1.207e-002	(O.K)

Cumulants Results

Diameter (d)	: 114.1	(nm)
Polydispersity Index (P.I.)	: 0.201	
Diffusion Const. (D)	: 4.311e-008	(cm ² /sec)
Measurement Condition		
Temperature	: 25.0	(°C)
Diluent Name	: WATER	
Refractive Index	: 1.3328	
Viscosity	: 0.8878	(cP)
Scattering Intensity	: 31627	(cps)
Attenuator 1	: 65.58	(%)

Intensity Distribution Table

d (nm)	f(%)	f(cum.%)	d (nm)	f(%)	f(cum.%)	d (nm)	f(%)	f(cum.%)	d (nm)	f(%)	f(cum.%)
1.0	0.0	0.0	6.7	0.0	0.0	45.3	0.0	0.0	304.7	0.0	100.0
1.1	0.0	0.0	7.3	0.0	0.0	48.9	0.6	0.6	328.9	0.0	100.0
1.2	0.0	0.0	7.8	0.0	0.0	52.7	1.1	1.6	354.9	0.0	100.0
1.3	0.0	0.0	8.5	0.0	0.0	56.9	1.8	3.4	383.1	0.0	100.0
1.4	0.0	0.0	9.1	0.0	0.0	61.4	2.6	5.9	413.4	0.0	100.0
1.5	0.0	0.0	9.9	0.0	0.0	66.3	3.4	9.4	446.2	0.0	100.0
1.6	0.0	0.0	10.6	0.0	0.0	71.6	4.3	13.7	481.5	0.0	100.0
1.7	0.0	0.0	11.5	0.0	0.0	77.2	5.2	18.9	519.7	0.0	100.0
1.8	0.0	0.0	12.4	0.0	0.0	83.3	6.0	24.8	560.9	0.0	100.0
2.0	0.0	0.0	13.4	0.0	0.0	90.0	6.6	31.4	605.3	0.0	100.0
2.1	0.0	0.0	14.4	0.0	0.0	97.1	7.1	38.5	653.3	0.0	100.0
2.3	0.0	0.0	15.6	0.0	0.0	104.8	7.3	45.8	705.0	0.0	100.0
2.5	0.0	0.0	16.8	0.0	0.0	113.1	7.4	53.3	760.9	0.0	100.0
2.7	0.0	0.0	18.1	0.0	0.0	122.0	7.3	60.6	821.2	0.0	100.0
2.9	0.0	0.0	19.6	0.0	0.0	131.7	7.0	67.5	886.3	0.0	100.0
3.1	0.0	0.0	21.1	0.0	0.0	142.1	6.5	74.0	956.5	0.0	100.0
3.4	0.0	0.0	22.8	0.0	0.0	153.4	5.9	79.9	1032.3	0.0	100.0
3.7	0.0	0.0	24.6	0.0	0.0	165.6	5.1	85.0	1114.1	0.0	100.0
3.9	0.0	0.0	26.6	0.0	0.0	178.7	4.3	89.3	1202.4	0.0	100.0
4.3	0.0	0.0	28.7	0.0	0.0	192.8	3.5	92.8	1297.7	0.0	100.0
4.6	0.0	0.0	30.9	0.0	0.0	208.1	2.7	95.5	1400.5	0.0	100.0
5.0	0.0	0.0	33.4	0.0	0.0	224.6	2.0	97.5	1511.5	0.0	100.0
5.4	0.0	0.0	36.0	0.0	0.0	242.4	1.3	98.8	1631.2	0.0	100.0
5.8	0.0	0.0	38.9	0.0	0.0	261.6	0.8	99.6	1760.5	0.0	100.0
6.2	0.0	0.0	42.0	0.0	0.0	282.3	0.4	100.0	1900.0	0.0	100.0
D (10%) :	67	(nm)	D (50%) :	109.4	(nm)	D (90%) :	181.3	(nm)			

Pembacaan pertama



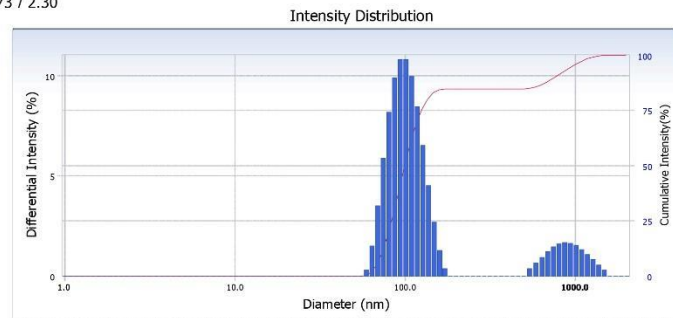
Delsa™ Nano
Common

Intensity Distribution

S/N : 142812

User : Common	Group : GEL	Repetition : 2/3
Date : 3/17/2026	File Name : AI 170326	
Time : 01:24:44	Sample Information : AI 170326	
SOP Name : Gel	Security : No Security	

Version 3.73 / 2.30



Distribution Results (Contin)

Peak	Diameter (nm)	Std. Dev.
1	100.8	22.2
2	909.7	224.3
3	0.0	0.0
4	0.0	0.0
5	0.0	0.0
Average	224.7	305.0
Residual :	3.021e-003	(O.K)

Cumulants Results

Diameter (d)	: 111.0	(nm)
Polydispersity Index (P.I.)	: 0.227	
Diffusion Const. (D)	: 4.430e-008	(cm ² /sec)
Measurement Condition		
Temperature	: 25.0	(°C)
Diluent Name	: WATER	
Refractive Index	: 1.3328	
Viscosity	: 0.8878	(cP)
Scattering Intensity	: 32271	(cps)
Attenuator 1	: 65.58	(%)

Intensity Distribution Table

d (nm)	f(%)	f(cum.%)	d (nm)	f(%)	f(cum.%)	d (nm)	f(%)	f(cum.%)	d (nm)	f(%)	f(cum.%)
1.0	0.0	0.0	6.8	0.0	0.0	46.5	0.0	0.0	316.8	0.0	84.7
1.1	0.0	0.0	7.4	0.0	0.0	50.2	0.0	0.0	342.1	0.0	84.7
1.2	0.0	0.0	7.9	0.0	0.0	54.2	0.0	0.0	369.4	0.0	84.7
1.3	0.0	0.0	8.6	0.0	0.0	58.5	0.3	0.3	398.9	0.0	84.7
1.4	0.0	0.0	9.3	0.0	0.0	63.2	1.5	1.8	430.7	0.0	84.7
1.5	0.0	0.0	10.0	0.0	0.0	68.2	3.5	5.3	465.0	0.0	84.7
1.6	0.0	0.0	10.8	0.0	0.0	73.7	5.9	11.2	502.2	0.0	84.7
1.7	0.0	0.0	11.7	0.0	0.0	79.5	8.2	19.4	542.2	0.4	85.1
1.8	0.0	0.0	12.6	0.0	0.0	85.9	9.9	29.3	585.5	0.7	85.7
2.0	0.0	0.0	13.6	0.0	0.0	92.7	10.8	40.1	632.2	0.9	86.7
2.2	0.0	0.0	14.7	0.0	0.0	100.1	10.8	50.9	682.7	1.2	87.9
2.3	0.0	0.0	15.9	0.0	0.0	108.1	10.0	60.8	737.2	1.5	89.3
2.5	0.0	0.0	17.1	0.0	0.0	116.8	8.4	69.3	796.0	1.6	91.0
2.7	0.0	0.0	18.5	0.0	0.0	126.1	6.5	75.8	859.5	1.7	92.6
2.9	0.0	0.0	20.0	0.0	0.0	136.1	4.5	80.3	928.1	1.7	94.3
3.2	0.0	0.0	21.6	0.0	0.0	147.0	2.7	83.0	1002.2	1.5	95.8
3.4	0.0	0.0	23.3	0.0	0.0	158.7	1.3	84.3	1082.1	1.3	97.2
3.7	0.0	0.0	25.1	0.0	0.0	171.4	0.4	84.7	1168.5	1.1	98.3
4.0	0.0	0.0	27.2	0.0	0.0	185.1	0.0	84.7	1261.7	0.8	99.1
4.3	0.0	0.0	29.3	0.0	0.0	199.9	0.0	84.7	1362.4	0.6	99.7
4.6	0.0	0.0	31.7	0.0	0.0	215.8	0.0	84.7	1471.1	0.3	100.0
5.0	0.0	0.0	34.2	0.0	0.0	233.0	0.0	84.7	1588.5	0.0	100.0
5.4	0.0	0.0	36.9	0.0	0.0	251.6	0.0	84.7	1715.3	0.0	100.0
5.8	0.0	0.0	39.9	0.0	0.0	271.7	0.0	84.7	1852.2	0.0	100.0
6.3	0.0	0.0	43.0	0.0	0.0	293.4	0.0	84.7	2000.0	0.0	100.0
D (10%) : 72.5 (nm)			D (50%) : 99.5 (nm)			D (90%) : 760.4 (nm)					

Pembacaan Kedua



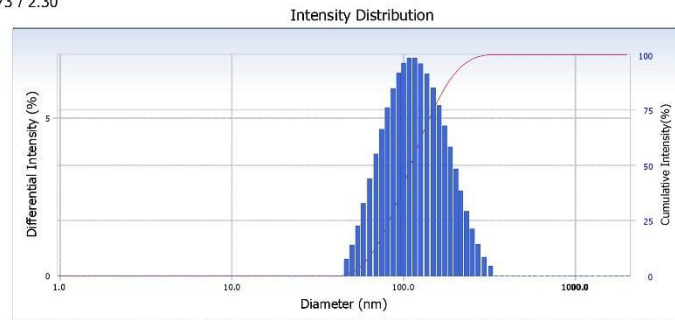
Delsa™ Nano
Common

Intensity Distribution

S/N : 142812

User : Common	Group : GEL	Repetition : 3/3
Date : 3/17/2026	File Name : AI 170326	
Time : 01:24:44	Sample Information : AI 170326	
SOP Name : Gel	Security : No Security	

Version 3.73 / 2.30



Distribution Results (Contin)

Peak	Diameter (nm)	Std. Dev.
1	125.3	52.1
2	0.0	0.0
3	0.0	0.0
4	0.0	0.0
5	0.0	0.0
Average	125.3	52.1

Residual : 1.189e-002 (O.K)

Cumulants Results

Diameter (d) : 113.5 (nm)
Polydispersity Index (P.I.) : 0.216
Diffusion Const. (D) : 4.333e-008 (cm²/sec)

Measurement Condition

Temperature : 25.0 (°C)
Diluent Name : WATER
Refractive Index : 1.3328
Viscosity : 0.8878 (cP)
Scattering Intensity : 32597 (cps)
Attenuator 1 : 65.58 (%)

Intensity Distribution Table

d (nm)	f(%)	f(cum.%)	d (nm)	f(%)	f(cum.%)	d (nm)	f(%)	f(cum.%)	d (nm)	f(%)	f(cum.%)
1.0	0.0	0.0	6.8	0.0	0.0	46.5	0.5	0.5	316.8	0.3	100.0
1.1	0.0	0.0	7.4	0.0	0.0	50.2	1.0	1.5	342.1	0.0	100.0
1.2	0.0	0.0	7.9	0.0	0.0	54.2	1.6	3.1	369.4	0.0	100.0
1.3	0.0	0.0	8.6	0.0	0.0	58.5	2.3	5.4	398.9	0.0	100.0
1.4	0.0	0.0	9.3	0.0	0.0	63.2	3.1	8.5	430.7	0.0	100.0
1.5	0.0	0.0	10.0	0.0	0.0	68.2	3.9	12.3	465.0	0.0	100.0
1.6	0.0	0.0	10.8	0.0	0.0	73.7	4.6	17.0	502.2	0.0	100.0
1.7	0.0	0.0	11.7	0.0	0.0	79.5	5.3	22.3	542.2	0.0	100.0
1.8	0.0	0.0	12.6	0.0	0.0	85.9	5.9	28.2	585.5	0.0	100.0
2.0	0.0	0.0	13.6	0.0	0.0	92.7	6.4	34.7	632.2	0.0	100.0
2.2	0.0	0.0	14.7	0.0	0.0	100.1	6.7	41.4	682.7	0.0	100.0
2.3	0.0	0.0	15.9	0.0	0.0	108.1	6.9	48.3	737.2	0.0	100.0
2.5	0.0	0.0	17.1	0.0	0.0	116.8	6.9	55.2	796.0	0.0	100.0
2.7	0.0	0.0	18.5	0.0	0.0	126.1	6.7	61.9	859.5	0.0	100.0
2.9	0.0	0.0	20.0	0.0	0.0	136.1	6.4	68.3	928.1	0.0	100.0
3.2	0.0	0.0	21.6	0.0	0.0	147.0	5.9	74.2	1002.2	0.0	100.0
3.4	0.0	0.0	23.3	0.0	0.0	158.7	5.4	79.6	1082.1	0.0	100.0
3.7	0.0	0.0	25.1	0.0	0.0	171.4	4.8	84.4	1168.5	0.0	100.0
4.0	0.0	0.0	27.2	0.0	0.0	185.1	4.1	88.5	1261.7	0.0	100.0
4.3	0.0	0.0	29.3	0.0	0.0	199.9	3.4	91.8	1362.4	0.0	100.0
4.6	0.0	0.0	31.7	0.0	0.0	215.8	2.7	94.5	1471.1	0.0	100.0
5.0	0.0	0.0	34.2	0.0	0.0	233.0	2.1	96.6	1588.5	0.0	100.0
5.4	0.0	0.0	36.9	0.0	0.0	251.6	1.5	98.1	1715.3	0.0	100.0
5.8	0.0	0.0	39.9	0.0	0.0	271.7	1.0	99.1	1852.2	0.0	100.0
6.3	0.0	0.0	43.0	0.0	0.0	293.4	0.6	99.7	2000.0	0.0	100.0
D (10%) : 65.1 (nm)			D (50%) : 110.2 (nm)			D (90%) : 191.7 (nm)					

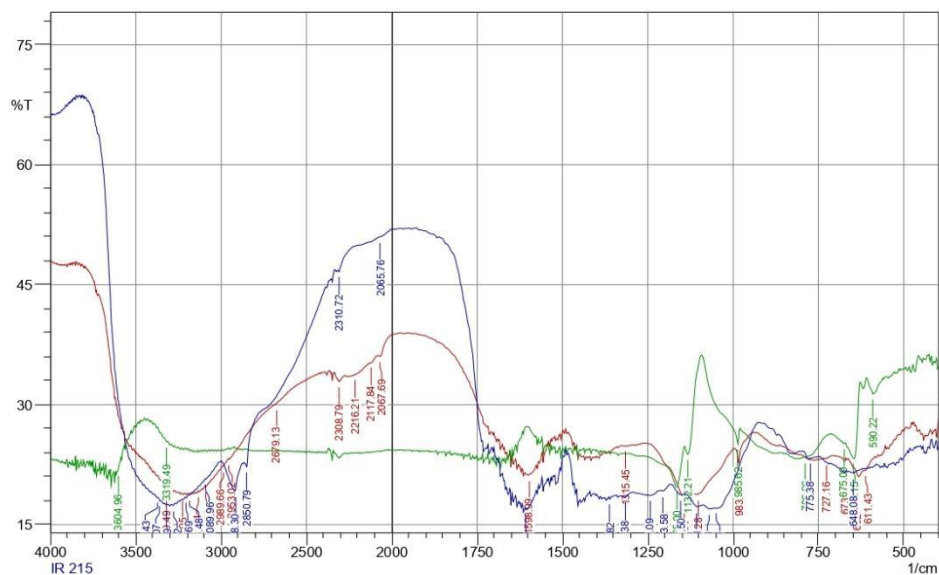
Pembacaan Ketiga

Cumulants results sampel ZnO-NP

Pembacaan ke	Diameter (nm)	Indeks polidispersitas (P.I)
1	114,1	0,201
2	111	0,227
3	113,5	0,216
Rata rata	112,87	0,215

Lampiran 3 Hasil Uji FTIR

SHIMADZU



	Peak	Intensity	Corr. Intensity	Base (H)	Base (L)	Area	Corr. Area
1	611.43	21.744	0.122	613.36	586.36	17.395	0.003
2	632.65	21.004	1.207	661.58	619.15	28.025	0.477
3	673.16	22.952	0.41	700.16	669.3	19.494	0.064
4	727.16	23.26	0.121	732.95	709.8	14.586	0.023
5	983.7	22.733	2.228	995.27	941.26	32.366	0.387
6	1103.28	18.79	0.431	1111	997.2	76.431	0.607
7	1141.86	18.465	1.183	1255.66	1128.36	84.028	0.697
8	1315.45	24.82	0.072	1321.24	1290.38	18.635	0.019
9	1598.99	21.206	0.261	1602.85	1577.77	16.686	0.152
10	2067.69	36.038	0.462	2079.26	1996.32	35.272	0.098
11	2117.84	35.26	0.112	2121.7	2086.98	15.531	0.017
12	2216.21	33.728	0.045	2218.14	2140.99	35.821	0.089
13	2308.79	32.866	0.99	2337.72	2274.07	30.349	0.389
14	2679.13	30.091	0.078	2682.98	2571.11	56.643	0.04
15	2953.02	23.175	0.162	2956.87	2682.98	156.352	0.058
16	2989.66	22.271	0.057	2991.59	2958.8	21.075	0.01
17	3089.96	19.784	0.181	3093.82	2995.45	66.822	0.27
18	3128.54	19.153	0.125	3132.4	3113.11	13.788	0.033
19	3223.05	18.765	0.184	3234.62	3211.48	16.759	0.037
20	3319.49	19.609	0.166	3334.92	3311.78	16.307	0.042
	Peak	Intensity	Corr. Intensity	Base (H)	Base (L)	Area	Corr. Area
1	590.22	31.33	1.907	607.58	563.21	21.837	0.608
2	646.15	23.265	6.252	669.3	628.79	24.139	2.309
3	675.09	25.159	0.111	713.66	671.23	25.012	0.019
4	786.96	23.447	0.19	790.81	723.31	41.118	0.317
5	985.62	25.089	2.109	1091.71	981.77	58.319	2.567
6	1132.21	23.801	3.284	1141.86	1093.64	25.816	0.949
7	1165	19.707	4.746	1246.02	1143.79	66.953	3.769
8	3319.49	25.367	0.227	3354.21	3313.71	23.822	0.082
9	3604.96	21.697	0.322	3608.81	3587.6	13.753	0.061
	Peak	Intensity	Corr. Intensity	Base (H)	Base (L)	Area	Corr. Area
1	648.08	21.461	0.261	661.58	636.51	16.694	0.067
2	775.38	23.276	0.036	777.31	752.24	15.818	0.012

Date/Time; 4/29/2026 11:30:09 AM

No. of Scans; 40



3	1047.35	17.039	0.696	1055.06	925.83	86.373	1.381
4	1068.56	16.985	0.247	1085.92	1056.99	22.189	0.112
5	1105.21	17.223	0.727	1138	1087.85	37.622	0.424
6	1151.5	18.723	0.247	1184.29	1145.72	27.61	0.137
7	1203.58	19.237	0.332	1213.23	1186.22	19.162	0.108
8	1244.09	18.66	0.131	1249.87	1215.15	25.121	0.084
9	1317.38	18.379	0.373	1328.95	1292.31	26.659	0.107
10	1359.82	18.206	0.298	1363.67	1342.46	15.535	0.03
11	1606.7	16.84	0.277	1608.63	1577.77	23.175	0.313
12	2065.76	50.989	0.04	2067.69	1996.32	20.578	0.016
13	2310.72	46.606	0.388	2316.51	2235.5	25.549	0.036
14	2850.79	22.223	1.065	2862.36	2387.87	226.558	0.165
15	2918.3	19.255	3.497	2997.38	2875.86	82.205	4.172
16	3089.96	20.697	0.133	3093.82	3032.1	41.341	0.174
17	3184.48	18.709	0.088	3188.33	3132.4	40.083	0.111
18	3205.69	18.363	0.133	3209.55	3190.26	14.119	0.028
19	3280.92	17.413	0.188	3290.56	3269.34	16.047	0.046
20	3319.49	17.474	0.133	3331.07	3311.78	14.583	0.037
21	3358.07	17.976	0.147	3371.57	3352.28	14.306	0.028
22	3375.43	18.427	0.064	3394.72	3371.57	16.919	0.019

Comment;

IR 213

IR 214

IR 215

4/29/2026 11:44:09 AM

40

Apodization; Happ-Genzel

Happ-Genzel

Happ-Genzel

Lab Sentral UM

Lab Sentral UM

Keterangan : IR 213 (ZnO nanopartikel), IR 214 (ZnH₂SO₄), IR 215 (Bubuk Mimba).

Lampiran 4 Perhitungan Taraf Zn nanopartikel

A. Perhitungan Pembuatan Larutan Stok dan Pengenceran Nanopartikel ZnO

Pembuatan larutan nanopartikel ZnO dilakukan melalui dua tahap, yaitu pembuatan larutan stok dan pengenceran menjadi berbagai konsentrasi perlakuan.

1. Pembuatan Larutan Stok 1000 ppm

Larutan stok dibuat dengan konsentrasi 1000 ppm dengan volume target larutan stok yang disiapkan adalah 180 mL (0,18 L), sehingga massa nanopartikel ZnO yang dibutuhkan:

$$\begin{aligned} \text{Massa (mg)} &= \text{Konsentrasi (mg/L)} \times \text{Volume (L)} = 1000 \times 0,18 \\ &= 180 \text{ mg} \end{aligned}$$

2. Pengenceran Larutan Stok

Larutan stok 1000 ppm selanjutnya diencerkan untuk memperoleh konsentrasi 100 ppm, 200 ppm, dan 300 ppm. Perhitungan pengenceran menggunakan persamaan:

$$C_1 V_1 = C_2 V_2$$

Keterangan:

C_1 = konsentrasi larutan stok (ppm)

V_1 = volume larutan stok yang diambil (mL)

C_2 = konsentrasi larutan yang diinginkan (ppm)

V_2 = volume akhir larutan (mL)

a. Konsentrasi 100 ppm

$$V_1 = \frac{C_2 \times V_2}{C_1} = \frac{100 \times 180}{1000} = 18 \text{ mL}$$

Sebanyak **18 mL larutan stok** diambil, kemudian ditambahkan aquades hingga volume mencapai 180 mL.

b. Konsentrasi 200 ppm

$$V_1 = \frac{200 \times 180}{1000} = 36 \text{ mL}$$

Sebanyak **36 mL larutan stok** diambil, kemudian ditambahkan aquades hingga volume mencapai 180 mL.

c. Konsentrasi 300 ppm

$$V_1 = \frac{300 \times 180}{1000} = 54 \text{ mL}$$

Sebanyak **54 mL larutan stok** diambil, kemudian ditambahkan aquades hingga volume mencapai 180 mL.

B. Perhitungan Pembuatan Larutan Zinc Sulfat ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) 400 ppm

Pembuatan larutan zinc sulfat dilakukan dengan pendekatan berbasis unsur, di mana konsentrasi 400 ppm diartikan sebagai 400 mg Zn per liter larutan. Volume larutan yang akan dibuat adalah 180 mL (0,18 L).

1. Perhitungan Kebutuhan Zn

Jumlah Zn yang dibutuhkan dihitung menggunakan persamaan:

$$\begin{aligned} \text{Massa Zn (mg)} &= \text{Konsentrasi (mg/L)} \times \text{Volume (L)} = 400 \times 0,18 \\ &= 72 \text{ mg Zn} \end{aligned}$$

2. Konversi ke $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$

Karena senyawa yang digunakan adalah $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (heptahidrat), maka dilakukan konversi berdasarkan massa molekul relatif (Mr).

- Mr Zn = 65,38

- $M_r \text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} = 287,54$

Fraksi Zn dalam $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$:

$$\frac{65,38}{287,54} = 0,227$$

Massa $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ yang dibutuhkan:

$$\frac{72}{0,227} = 317,18 \text{ mg}$$

Sehingga, dibuthkan 317 mg $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ untuk stock 180 mL.

Lampiran 5 Perhitungan Penentuan Kapasitas Lapang Tanah

A. Penentuan Kadar Air Tanah Udara-Kering

Sebanyak 100 g tanah udara-kering dioven pada suhu 105°C hingga berat konstan.

Data mentah tanah udara-kering

Sampel	Berat awal (g)	Berat setelah oven (g)
1	100	66,5
2	100	66,0
3	100	65,5
4	100	65,0
5	100	66,5
6	100	68,0

Rata-rata berat kering oven

$$\frac{66,5 + 66,0 + 65,5 + 65,0 + 66,5 + 68,0}{6} = 66,25 \text{ g}$$

Perhitungan kadar air tanah udara-kering

Rumus:

$$KA = \frac{BB - BK}{BK} \times 100\%$$

Keterangan:

- KA = kadar air (%)
- BB = berat basah (g)
- BK = berat kering oven (g)

Substitusi:

$$KA = \frac{100 - 66,25}{66,25} \times 100\% = \frac{33,75}{66,25} \times 100\% = 0,5094 \text{ atau } 50,94\%$$

Sehingga kadar air tanah udara-kering adalah 50,94% atau 0,5094 *g air / g tanah kering*

B. Penentuan Berat Tanah Udara-Kering untuk Mendapatkan 5 kg Tanah Kering Oven

Target tanah kering oven dalam polybag:

$$5 \text{ kg} = 5000 \text{ g}$$

Karena tanah udara-kering masih mengandung air sebesar 50,94%, maka massa tanah udara-kering yang harus ditimbang dihitung menggunakan rumus:

$$\begin{aligned} & \text{Berat tanah udara – kering} \\ &= \text{Berat tanah kering oven} \\ &+ (\text{kadar air tanah} \times \text{berat tanah} \\ & \quad \text{kering oven}) \end{aligned}$$

Maka:

$$\begin{aligned} & \text{Berat tanah udara – kering} \\ &= 5000 + (0,5094 \times 5000) \\ &= 5000 + 2547 \qquad \qquad \qquad = 7547 \text{ g} \end{aligned}$$

Sehingga massa tanah udara-kering yang harus dimasukkan ke polybag agar diperoleh 5 kg tanah kering oven adalah:

$$7547 \text{ g}$$

C. Penentuan Kapasitas Lapang Tanah

Tanah dijenuhkan selama 2 hari, kemudian di oven pada suhu 105°C hingga berat konstan.

Data mentah tanah jenuh

Sampel	Berat tanah jenuh (g)	Berat setelah oven (g)
1	100	57,8
2	100	53,4
3	100	56,5
4	100	59,5
5	100	60,8

Rata-rata berat kering oven tanah jenuh

$$\frac{57,8 + 53,4 + 56,5 + 59,5 + 60,8}{5} = 57,6 \text{ g}$$

Perhitungan kadar air kapasitas lapang

$$KA = \frac{100 - 57,6}{57,6} \times 100\% = \frac{42,4}{57,6} \times 100\% = 73,61\%$$

Sehingga kadar air kapasitas lapang tanah adalah:

$$73,61\% \text{ atau } 0,7361 \text{ g air/g tanah kering}$$

D. Perhitungan Selisih Air dari Tanah Udara-Kering ke Kapasitas Lapang

Jumlah air yang perlu ditambahkan untuk sampai pada kapasitas lapang diperoleh dari selisih kadar air kapasitas lapang dengan kadar air tanah udara-kering.

$$0,7361 - 0,5094 = 0,2267 \text{ g air/g tanah}$$

Artinya setiap 1 g tanah membutuhkan tambahan:

$$0,2267 \text{ g air}$$

untuk mencapai kapasitas lapang.

E. Perhitungan Kebutuhan Air untuk 5 kg Tanah

Target tanah kering oven:

$$5 \text{ kg} = 5000 \text{ g}$$

1. Perlakuan 100% Kapasitas Lapang

$$0,2267 \times 5000 = 1133,5 \text{ g air}$$

Karena densitas air = 1 g/mL maka $1133,5 \text{ g} = 1133,5 \text{ mL}$

2. Perlakuan 75% Kapasitas Lapang

$$75\% \times 1134 = 850,5 \text{ mL}$$

3. Perlakuan 50% Kapasitas Lapang

$$50\% \times 1134 = 567 \text{ mL}$$

F. Ringkasan Volume Air Perlakuan

Perlakuan	Persentase kapasitas lapang	Volume air	Berat tanah setelah penyiraman
P1	100% KL	1134 mL	8,613 g
P2	75% KL	851 mL	8,398 g
P3	50% KL	567 mL	8,114 g

Lampiran 6 Perhitungan pupuk NPK

Pemupukan dilakukan dengan mengikuti rekomendasi kementerian pertanian (2022), di mana untuk kedelai di daerah pakis, malang. Membutuhkan urea 50 kg/ha, pospat 50 kg/ha, kalium 50 kg/ha. Selain itu untuk jarak tanam mengikuti Nazaruddin & Irmayanti (2020), yakni 30 x 30 cm atau 900 cm².

1. Menghitung Populasi Tanaman per Hektar

$$\text{Populasi} = \frac{\text{Luas Lahan}}{\text{Luas Jarak Tanam}}$$

perhitungan

$$\text{Populasi} = \frac{100.000.000 \text{ cm}^2}{900 \text{ cm}^2} = 111.111 \text{ tanaman}$$

2. Menghitung Dosis Pupuk per Tanaman

$$\text{Dosis per Tanaman} = \frac{\text{Dosis Rekomendasi per Ha}}{\text{Populasi Tanaman}}$$

perhitungan

$$\text{Dosis per Tanaman} = \frac{50.000 \text{ gram}}{111.111 \text{ tanaman}} = 0,45 \text{ gram}$$

3. Menghitung Dosis Pupuk per Unit Percobaan (Polybag)

$$\text{Dosis per Polybag} = \text{Dosis per Tanaman} \times \text{Jumlah Tanaman per Polybag}$$

perhitungan

$$\text{Dosis per Polybag} = 0,45 \text{ gram} \times 3 = 1,35 \text{ gram}$$

4. Menghitung Dosis Pupuk per Tahap Aplikasi

$$\text{Dosis per Aplikasi} = \frac{\text{Dosis per Polybag}}{\text{Frekuensi Aplikasi}}$$

Perhitungan

$$Dosis\ per\ Aplikasi = \frac{1,35\ gram}{2} = 0,675\ gram/aplikasi$$

Lampiran 7 Perhitungan larutan untuk uji prolin

A. Perhitungan Pembuatan Larutan Stok Prolin 1000 ppm

Diketahui:

- Konsentrasi yang diinginkan = 1000 ppm
- Volume larutan = 10 mL = 0,01 L

Rumus yang digunakan:

$$Massa (mg) = Konsentrasi (mg/L) \times Volume (L)$$

Sehingga:

$$Massa (mg) = 1000 \times 0,01 = 10 \text{ mg}$$

B. Perhitungan Pembuatan Reagen Ninhidrin 60 mL

Diketahui standar reagen ninhidrin:

- 1,25 g ninhidrin
- 30 mL asam asetat glasial
- 20 mL asam fosfat 6 M

Total volume:

$$30 + 20 = 50 \text{ mL}$$

Volume yang diinginkan:

$$60 \text{ mL}$$

Faktor pengali:

$$\frac{60}{50} = 1,2$$

Massa ninhidrin:

$$1,25 \times 1,2 = 1,50 \text{ g}$$

Volume asam asetat glasial:

$$30 \times 1,2 = 36 \text{ mL}$$

Volume asam fosfat 6 M:

$$20 \times 1,2 = 24 \text{ mL}$$

C. Perhitungan Pembuatan Larutan Asam Fosfat 6 M

Diketahui:

- Konsentrasi stok H_3PO_4 85% = 14,7 M
- Konsentrasi yang diinginkan = 6 M
- Volume yang diinginkan = 24 mL

Rumus Persamaan pengenceran:

$$M_1 V_1 = M_2 V_2 \quad 14,7 \times V_1 = 6 \times 24 \quad V_1 = \frac{144}{14,7} \quad V_1 = 9,80 \text{ mL}$$

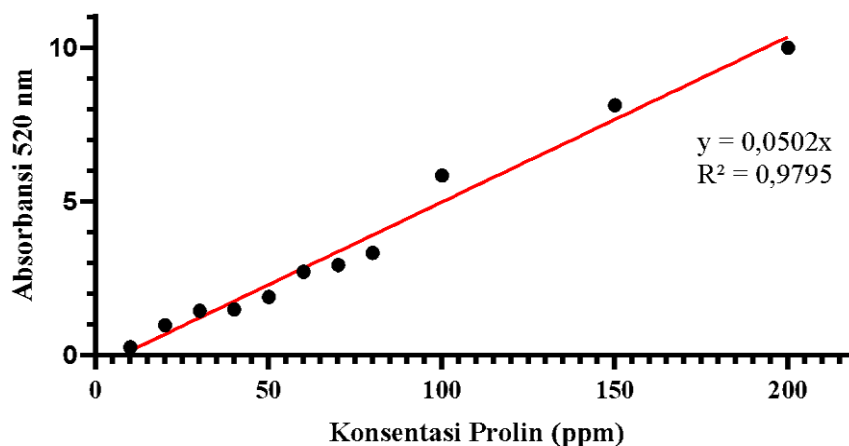
Volume aquades yang diperlukan:

$$24 - 9,80 = 14,20 \text{ mL}$$

Lampiran 8 Hasil uji kandungan prolin

Hasil Uji absorban standar kurva.

<i>Standard</i>	<i>Concentration mg/L</i>	<i>Mean</i>	<i>SD%</i>	<i>RSD</i>	<i>Readings</i>
Std 1					0,2694 0,2701
	10	0,2696	0,0005	0,18	0,2692 0,9792
Std 2					0,9875 0,9997
	20	0,9888	0,0103	1,04	1,45 1,4504
Std 3					1,4501 1,4979
	30	1,4502	0,0002	0,02	1,4973 1,4921
Std 4					1,907 1,8984
	40	1,4958	0,0032	0,21	1,8964 2,748
Std 5					2,7265 2,6889
	50	1,9006	0,0056	0,3	2,9723 2,9631
Std 6					2,8668 3,2856
	60	2,7211	0,0299	1,1	3,4211 3,2929
Std 7					3,9434 10
	70	2,9341	0,0585	1,99	3,5979 4,3803
Std 8					10 10
	80	3,3332	0,0762	2,29	10 10
Std 9					10 10
	100	5,8471	3,6007	61,5	10 10
Std 10					10 10
	150	8,1268	3,2446	39,9	10 10
Std 11					10 10
	200	10	0	0	10



Keterangan :Standar kurva Proline: Absorbansi diukur menggunakan spektrofotometer pada panjang gelombang 520 nm dengan persamaan regresi $y = 0,0502x$ dan koefisien determinasi $R^2 = 0,9795$.

Hasil Uji absorbansi sampel prolin

<i>Sample</i>	<i>replication</i>	<i>Mean</i>	<i>SD</i>	<i>%RSD</i>	<i>Readings</i>
P0K1	1				0,5257 0,5239
		0,5236	0,0023	0,44	0,5211
P0K3	1				0,3145 0,3094
		0,3122	0,0026	0,82	0,3127
P1K1	1				0,3649 0,3623
		0,3635	0,0013	0,36	0,3633
P1K2	1				0,5562 0,5563
		0,5576	0,0023	0,42	0,5603
P1K3	1				0,4777 0,4581
		0,4601	0,0167	3,64	0,4444
P2K1	1				0,7462 0,7416
		0,7417	0,0045	0,61	0,7372
P2K2	1				0,5951 0,5914
		0,5925	0,0022	0,37	0,5911
P2K3	1				0,2411

					0,2458
		0,2423	0,0032	1,3	0,2399
P3K1	1				0,7202
					0,7202
		0,7175	0,0047	0,65	0,7121
P3K2	1				0,4666
					0,463
		0,4632	0,0033	0,7	0,4601
P3K3	1				0,3033
					0,2983
		0,2993	0,0036	1,19	0,2963
P4K1	1				0,5462
					0,544
		0,5442	0,0019	0,35	0,5424
P4K2	1				0,5064
					0,5134
		0,5077	0,0052	1,03	0,5033
P4K3	1				1,1305
					1,1306
		1,1289	0,0029	0,26	1,1255
P0K1	2				0,4938
					0,4949
		0,4926	0,0031	0,64	0,489
P0K2	2				0,764
					0,7666
		0,7616	0,0064	0,84	0,7544
P0K3	2				0,4134
					0,4106
		0,41	0,0037	0,91	0,406
P1K1	2				0,31
					0,3097
		0,309	0,0015	0,48	0,3073
P1K2	2				0,3429
					0,3399
		0,3402	0,0026	0,77	0,3377
P1K3	2				0,7799
					0,7768
		0,7783	0,0016	0,2	0,7783
P2K1	2				0,5221
					0,5098
		0,5099	0,0122	2,39	0,4977
P2K2	2				0,3829

					0,3811
		0,3808	0,0024	0,62	0,3782
P2K3	2				0,3779
					0,3757
		0,374	0,005	1,34	0,3683
P3K1	2				0,2853
					0,2837
		0,2836	0,0017	0,6	0,2819
P3K2	2				0,3913
					0,3884
		0,3892	0,0019	0,48	0,3879
P3K3	2				0,4767
					0,4753
		0,4754	0,0013	0,27	0,4741
P4K1	2				0,3292
					0,3289
		0,3284	0,0011	0,33	0,3272

Uji spss Prolin

Descriptives

Kapasitas lapang				Statistic	Std. Error
porline per berat segar	100 Kapasitas lapang	Mean		3.01	.327
		95% Confidence Interval for Mean	Lower Bound	2.31	
			Upper Bound	3.71	
		5% Trimmed Mean		2.93	
		Median		2.53	
		Variance		1.607	
		Std. Deviation		1.268	
		Minimum		2	
		Maximum		6	
		Range		4	
		Interquartile Range		2	
		Skewness		1.029	.580
		Kurtosis		.302	1.121
	75%Kapasitas lapang	Mean		3.23	.173
		95% Confidence Interval for Mean	Lower Bound	2.86	
			Upper Bound	3.60	
		5% Trimmed Mean		3.20	
		Median		3.15	
		Variance		.451	
		Std. Deviation		.671	
		Minimum		2	
		Maximum		5	
		Range		3	
		Interquartile Range		1	
		Skewness		.938	.580
		Kurtosis		1.815	1.121
	50% Kapasitas lapang	Mean		3.25	.371
		95% Confidence Interval for Mean	Lower Bound	2.45	
			Upper Bound	4.05	
		5% Trimmed Mean		3.12	
		Median		2.97	
		Variance		2.068	
		Std. Deviation		1.438	
		Minimum		2	
		Maximum		7	
		Range		6	
		Interquartile Range		2	
		Skewness		1.725	.580
		Kurtosis		3.758	1.121

Descriptives

pupuk				Statistic	Std. Error
porline per berat segar	0 ppm	Mean		5.70459	.310185
		95% Confidence Interval for Mean	Lower Bound	4.98931	
			Upper Bound	6.41988	
		5% Trimmed Mean		5.67369	
		Median		5.74659	
		Variance		.866	
		Std. Deviation		.930555	
		Minimum		4.481	
		Maximum		7.485	
		Range		3.004	
		Interquartile Range		1.332	
		Skewness		.560	.717
		Kurtosis		.559	1.400
	100 ppm ZnO-NP	Mean		5.99370	.442438
		95% Confidence Interval for Mean	Lower Bound	4.97343	
			Upper Bound	7.01396	
		5% Trimmed Mean		5.93687	
		Median		5.53660	
		Variance		1.762	
		Std. Deviation		1.327313	
		Minimum		4.560	
		Maximum		8.450	
		Range		3.890	
		Interquartile Range		2.206	
		Skewness		.874	.717
		Kurtosis		-.169	1.400
	200 ppm ZnO-NP	Mean		5.41183	.346589
		95% Confidence Interval for Mean	Lower Bound	4.61260	
			Upper Bound	6.21106	
		5% Trimmed Mean		5.37506	
		Median		5.08109	
		Variance		1.081	
		Std. Deviation		1.039766	
		Minimum		4.129	
		Maximum		7.356	
		Range		3.227	
		Interquartile Range		1.547	
		Skewness		.605	.717
		Kurtosis		.097	1.400

300 ppm ZnO-NP	Kurtosis		.097	1.400
	Mean		5.50868	.323590
	95% Confidence Interval for Mean	Lower Bound	4.76248	
		Upper Bound	6.25488	
	5% Trimmed Mean		5.47653	
	Median		5.55663	
	Variance		.942	
	Std. Deviation		.970769	
	Minimum		4.396	
	Maximum		7.200	
	Range		2.804	
	Interquartile Range		1.722	
	Skewness		.560	.717
	Kurtosis		-.650	1.400
400 ppm Zn sulfat	Mean		6.01663	.504971
	95% Confidence Interval for Mean	Lower Bound	4.85217	
		Upper Bound	7.18110	
	5% Trimmed Mean		5.87718	
	Median		5.76824	
	Variance		2.295	
	Std. Deviation		1.514914	
	Minimum		4.686	
	Maximum		9.858	
	Range		5.172	
	Interquartile Range		.924	
	Skewness		2.440	.717
	Kurtosis		6.729	1.400

Tests of Between-Subjects Effects

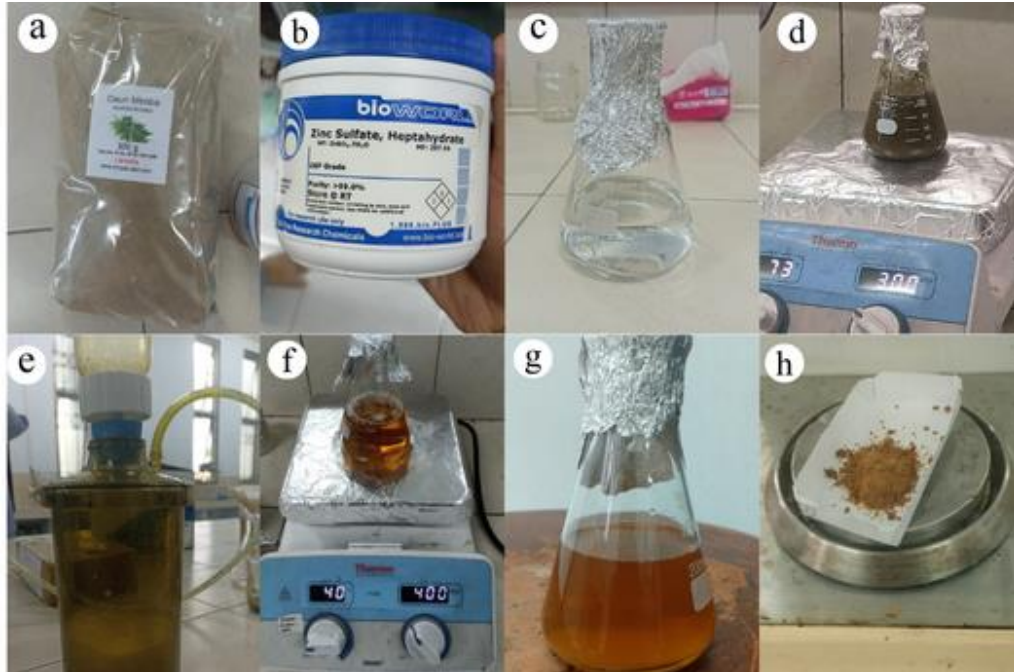
Dependent Variable: porline per berat segar

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	14.219 ^a	14	1.016	.691	.765
Intercept	1475.978	1	1475.978	1004.689	<.001
kekeringan	.542	2	.271	.184	.832
pupuk	2.723	4	.681	.463	.762
kekeringan * pupuk	10.954	8	1.369	.932	.505
Error	44.073	30	1.469		
Total	1534.270	45			
Corrected Total	58.292	44			

a. R Squared = .244 (Adjusted R Squared = -.109)

Lampiran 9 Dokumentasi penelitian

A. Dokumentasi sintesis nanopartikel



Keterangan : (a) Bubuk daun Mimba, (b) zinc sulfat, (c) zinc sulfat yang sudah terlarutkan, (d) Proses ekstraksi mimba, (e) filtrasi ekstrak mimba dengan vacum pump, (f) Proses sintesis, (g) larutan hasil sintesis, (h) Hasil sintesis setelah di *freeze dry*.

B. Dokumentasi tahapan persiapan media dan benih kedelai:



Keterangan : (a) Media tanah, (b) Kompos kambing, (c) Timbangan tanah, (d) Proses pencampuran tanah dan kompos, (e) Proses penimbangan tanah untuk metode gravimetri, (f) Tanah sebelum dan sesudah di oven, (g) Benih kedelai, (h) Proses perendaman benih kedelai.

C. Dokumentasi persiapan aplikasi nanopartikel dan pemupukan NPK



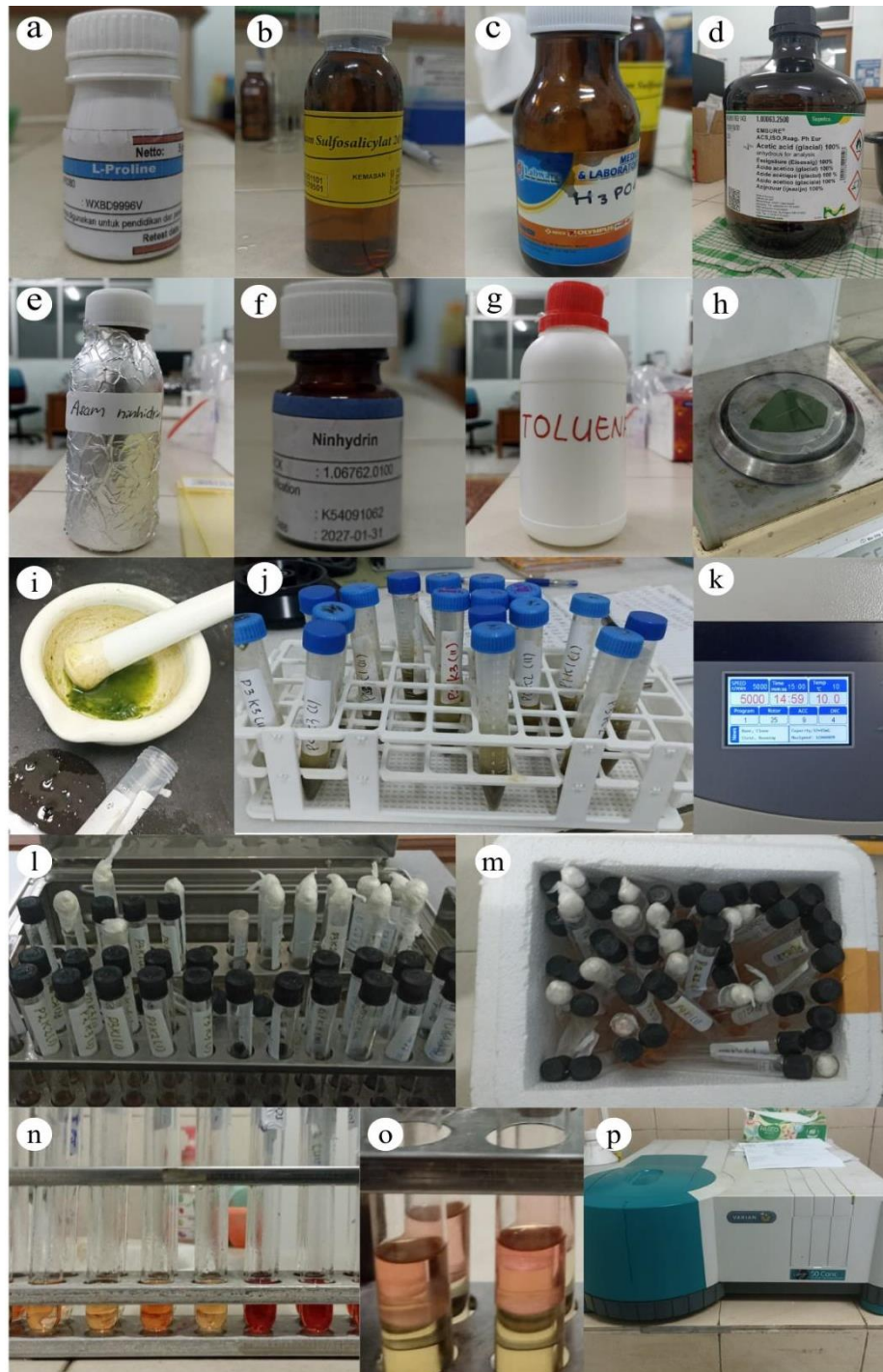
Keterangan: (a) Sonikasi nanopartikel, (b) Spray perlakuan, (c) Penimbangan NPK.

D. Dokumentasi perkembangan Tanaman



Keterangan :Perkembangan tanaman pada beberapa tahap hari setelah tanam (HST): a) HST 4, (b)HST 15, (c)HST 22, (d)HST 36.

E. Dokumentasi uji prolin



Keterangan :Bahan & tahap uji proline:(a) L-Proline, (b) Asam sulfosalisilat, (c)Asam fosfat, (d) Asam asetat galsial. (e) Asam ninhidrin, (f) ninhidrin, (g) tolena, (h) tahanan penimbangan daun, (i) penggerusan daun, (j), persiapan untuk sentrifugasi, (k) tahap sentrifugasi, (l) tahap Pemanasan *water bath*, (m) tahap pendinginan, (n) sampel setelah pendinginan, (o) sampel + tolena, (p) tahap uji spektrometri.

Lampiran 10 Bukti bimbingan



KEMENTERIAN AGAMA
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM MALANG
Jalan Gajayana Nomor 50, Telepon (0341) 551354, Fax. (0341) 572533
Website: <http://www.uin-malang.ac.id> Email: info@uin-malang.ac.id

JURNAL BIMBINGAN SKRIPSI/TESIS/DISERTASI

IDENTITAS MAHASISWA

NIM : 220602110135
Nama : NOFAL ALDI HUSAINI
Fakultas : SAINS DAN TEKNOLOGI
Jurusan : BIOLOGI
Dosen Pembimbing 1 : Prof. Dr. EVIKA SANDI SAVITRI, M.P.
Dosen Pembimbing 2 : KIVAH AHA PUTRA, M.Pd.I
Judul Skripsi/Tesis/Disertasi : APLIKASI NANO FERTILIZER ZINC (ZnO-NP) EKSTRAK NIMBA (*Azadirachta indica*) TERHADAP KARAKTER BIOKIMIAWI KEDELAI (*Glycine max L.*) PADA STRES KEKERINGAN

IDENTITAS BIMBINGAN

No	Tanggal Bimbingan	Nama Pembimbing	Deskripsi Proses Bimbingan	Tahun Akademik	Status
1	06 Mei 2025	Prof. Dr. EVIKA SANDI SAVITRI, M.P.	Diskusi topik penelitian	Genap 2025/2026	Sudah Dikoreksi
2	30 Juni 2025	Prof. Dr. EVIKA SANDI SAVITRI, M.P.	ACC judul skripsi	Genap 2025/2026	Sudah Dikoreksi
3	27 Agustus 2025	Prof. Dr. EVIKA SANDI SAVITRI, M.P.	Bimbingan bab 1,2,3	Ganjil 2025/2026	Sudah Dikoreksi
4	10 September 2025	Prof. Dr. EVIKA SANDI SAVITRI, M.P.	ACC bab 1 & 2 dan bimbingan bab 3	Genap 2025/2026	Sudah Dikoreksi
5	17 September 2025	Prof. Dr. EVIKA SANDI SAVITRI, M.P.	Bimbingan bab 3	Ganjil 2025/2026	Sudah Dikoreksi
6	24 September 2025	Prof. Dr. EVIKA SANDI SAVITRI, M.P.	ACC bab 3	Ganjil 2025/2026	Sudah Dikoreksi
7	14 Oktober 2025	KIVAH AHA PUTRA, M.Pd.I	Bimbingan ayat tafsir dan hadits	Ganjil 2025/2026	Sudah Dikoreksi
8	15 Oktober 2025	KIVAH AHA PUTRA, M.Pd.I	Acc integrasi Al-Qur'an dan hadits	Ganjil 2025/2026	Sudah Dikoreksi
9	28 Maret 2026	Prof. Dr. EVIKA SANDI SAVITRI, M.P.	Bimbingan persiapan penanaman	Genap 2026/2027	Sudah Dikoreksi
10	08 April 2026	Prof. Dr. EVIKA SANDI SAVITRI, M.P.	Bimbingan hasil nanopartikel	Genap 2026/2027	Sudah Dikoreksi
11	22 Mei 2026	KIVAH AHA PUTRA, M.Pd.I	Bimbingan agama integrasi dan tafsir	Genap 2026/2027	Sudah Dikoreksi
12	25 Mei 2026	KIVAH AHA PUTRA, M.Pd.I	Bimbingan agama bab 4	Genap 2026/2027	Sudah Dikoreksi
13	26 Mei 2026	Prof. Dr. EVIKA SANDI SAVITRI, M.P.	Bimbingan kepenulisan pembahasan	Genap 2026/2027	Sudah Dikoreksi
14	03 Juni 2026	KIVAH AHA PUTRA, M.Pd.I	Bimbingan agama dan ACC ayat integrasi	Genap 2026/2027	Sudah Dikoreksi
15	03 Juni 2026	Prof. Dr. EVIKA SANDI SAVITRI, M.P.	ACC bab 4 dan keseluruhan	Genap 2026/2027	Sudah Dikoreksi

Telah disetujui
Untuk mengajukan ujian Skripsi/Tesis/Desertasi

Dosen Pembimbing 2

KIVAH AHA PUTRA, M.Pd.I

Malang, _____
Dosen Pembimbing 1

Prof. Dr. EVIKA SANDI SAVITRI, M.P.

Kajur / Kaprodi,

Lampiran 11 Bukti cek plagiasi



KEMENTERIAN AGAMA
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM MALANG
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
PROGRAM STUDI BIOLOGI

Jl. Gajayana No. 50 Malang 65144 Telp./ Faks. (0341) 558933
 Website: <http://biologi.uin-malang.ac.id> Email: biologi@uin-malang.ac.id

Form Checklist Plagiasi

Nama : Nofal Aldi Husaini
NIM : 220602110135
Judul : Aplikasi *Nano Fertilizer* Zink (ZnO-NP) Sintesis Mimba (*Azadirachta Indica*) Terhadap Kandungan Prolin Kedelai (*Glycine Max L.*) Pada Stress Kekeringan

No	Tim Check plagiasi	Skor Plagiasi	TTD
1	Azizatur Rohmah, M.Sc		
2	Berry Fakhry Hanifa, M.Sc		
3	Bayu Agung Prahardika, M.Si		
4	Tyas Nyonita Punjungsari, M.Sc		
5	Maharani Retna Duhita, M.Sc., PhD.Med.Sc	17%	

Mengetahui,
 Ketua Program Studi Biologi

Prof. Dr. Retno Susilowati, M.Si
 NIP. 19671113 199402 2 001