

Physiological Response of Mentik Wangi Rice (*Oryza sativa* L.) to Zinc oxide Nanoparticles Under Drought Stress

Abdul Ghaffar Amiruddin Zaki^{1*}, Yovi Avianto¹, Henra¹, Rina Puji Lestari²

¹Program Studi Agroteknologi, Institut Pertanian Stiper, Yogyakarta, Indonesia;

²Program Studi Pengelolaan Perkebunan, Politeknik LPP Yogyakarta, Indonesia;

Article History

Received: June 07th, 2026

Revised : June 30th, 2026

Accepted : July 15th, 2026

*Corresponding Author: **Abdul Ghaffar Amiruddin Zaki**, Stiper Agricultural University, Yogyakarta, Indonesia, Email: abdulghaffaraz@instiperjogja.ac.id

Abstract: Mentik wangi rice (*Oryza sativa* L.) is a local aromatic Indonesian variety known for its superior grain quality but susceptible to drought Stress. Zinc Oxide Nanoparticles (ZnO-NPs) have been widely investigated as nano-fertilizers to improve plant physiological performance under abiotic stress; however, information regarding their effects on the local aromatic rice cultivar Mentik Wangi remains limited. This study aimed to evaluate the physiological responses of Mentik Wangi rice to ZnO-NPs application under drought stress and to identify the most effective ZnO-NPs concentration for each physiological parameter. The experiment was arranged in a factorial Completely Randomized Design with two water regimes (50% and 100% field capacity) and six ZnO-NPs concentrations (0, 0.75, 1.50, 2.25, 3.00, and 3.75 ppm). Data were analyzed using two-way analysis of variance followed by Duncan's Multiple Range Test at the 5% significance level. Under drought stress, ZnO-NPs at 2.25 ppm produced the highest photosynthetic rate ($0.79 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) and improved membrane stability index, whereas 1.50 ppm resulted in the lowest transpiration rate ($0.016 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) and the highest proline accumulation. Chlorophyll content also increased under normal conditions following the application of 2.25 ppm ZnO-NPs. In contrast, ZnO-NPs did not significantly affect ascorbic acid content or relative water content. These findings indicate that the physiological response of Mentik Wangi rice to ZnO-NPs depends on the parameter evaluated, with 2.25 ppm and 1.50 ppm producing the most favorable responses for different physiological traits under the conditions of this study.

Keywords: Drought Stress; Mentik Wangi Rice; ZnO-NPs.

Pendahuluan

Padi (*Oryza sativa* L.) merupakan salah satu komoditas pangan utama dunia yang menjadi sumber karbohidrat pokok bagi lebih dari separuh populasi global, khususnya di negara Indonesia. Mentik Wangi merupakan varietas padi lokal yang berasal dari Kabupaten Magelang, Jawa Tengah, dengan keunggulan aroma khas dan tekstur pulen, namun memiliki kelemahan agronomis mudah rebah dan kurang tahan terhadap cekaman kekeringan (Herlina & Julsento, 2024). Produktivitas padi sangat rentan terhadap gangguan lingkungan, khususnya cekaman abiotik seperti kekeringan. Cekaman kekeringan dapat menghambat berbagai proses

fisiologis termasuk fotosintesis, transpirasi, penyerapan unsur hara, dan metabolisme tanaman secara keseluruhan, sehingga berdampak pada penurunan hasil panen.

Cekaman kekeringan menjadi faktor abiotik utama yang membatasi produktivitas padi, sehingga diperlukan identifikasi genotipe lokal yang toleran untuk mendukung budidaya pada lahan tadah hujan (Ezward *et al.*, 2023). Perubahan iklim saat ini diperkirakan akan meningkatkan frekuensi dan intensitas kekeringan, terutama di daerah-daerah penghasil padi, sehingga diperlukan strategi adaptif untuk meningkatkan ketahanan tanaman terhadap cekaman tersebut. Perubahan iklim berdampak

signifikan terhadap produksi padi melalui pergeseran musim tanam, gangguan ketersediaan air, serta peningkatan frekuensi serangan hama dan penyakit, sehingga memerlukan strategi adaptasi untuk menjaga ketahanan pangan (Yusni *et al.*, 2024).

Nanoteknologi telah berkembang sebagai salah satu pendekatan inovatif dalam fisiologi tanaman karena mampu meningkatkan efisiensi pemanfaatan unsur hara dan memperbaiki respons tanaman terhadap berbagai cekaman lingkungan melalui aplikasi nanomaterial. Pupuk berbasis nanopartikel dilaporkan memiliki efisiensi penggunaan hara yang lebih tinggi dibandingkan pupuk konvensional karena ukuran partikelnya yang kecil, luas permukaan yang besar, serta karakteristik pelepasan hara yang lebih terkendali, sehingga meningkatkan penyerapan unsur hara oleh tanaman (Kasim *et al.*, 2024). Di antara berbagai jenis nanomaterial, *Zinc Oxide Nanoparticles* (ZnO-NPs) menjadi salah satu yang banyak diteliti karena potensinya dalam meningkatkan toleransi tanaman terhadap cekaman abiotik.

Berbagai penelitian melaporkan bahwa aplikasi ZnO-NPs dapat meningkatkan kapasitas antioksidan tanaman, mempertahankan stabilitas membran sel, serta memperbaiki efisiensi fotosintesis dan pemanfaatan air pada berbagai spesies tanaman yang mengalami cekaman lingkungan (Kheyri, 2024; Nurbayasari *et al.*, 2017). Selain itu, aplikasi ZnO-NPs juga dilaporkan mampu meningkatkan kandungan klorofil, akumulasi prolin, dan kandungan air relatif pada tanaman yang mengalami cekaman kekeringan, meskipun respons tersebut dipengaruhi oleh spesies tanaman, tingkat cekaman, dan konsentrasi nanopartikel yang digunakan. Sementara itu, priming benih menggunakan Zn telah terbukti meningkatkan vigor bibit serta toleransi terhadap cekaman terendam pada padi (Sulaiman *et al.*, 2016).

Kekeringan sebagai salah satu cekaman abiotik utama menyebabkan penurunan produktivitas tanaman melalui gangguan proses morfologi, fisiologi, biokimia, dan molekuler yang memicu mekanisme *drought escape*, *avoidance*, dan *tolerance* (Rini *et al.*, 2020). Meskipun berbagai mekanisme fisiologis tersebut telah banyak dilaporkan pada varietas padi unggul dan tanaman model lainnya,

informasi mengenai respons fisiologis varietas lokal aromatik seperti Mentik Wangi terhadap aplikasi ZnO-NPs di bawah kondisi cekaman kekeringan masih sangat terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini berfokus pada evaluasi parameter fisiologis yang diukur secara langsung, yaitu laju fotosintesis, laju transpirasi, kandungan klorofil, indeks stabilitas membran, kandungan prolin, kandungan asam askorbat, dan kandungan air relatif sebagai indikator respons tanaman terhadap aplikasi ZnO-NPs.

Mentik Wangi merupakan salah satu varietas padi lokal Indonesia yang memiliki potensi agronomi dan kualitas beras unggul, tetapi hingga saat ini belum banyak mendapat perhatian dalam penelitian ilmiah, khususnya terkait ketahanan terhadap cekaman abiotik. Varietas ini dikenal sebagai padi aromatik khas Indonesia dengan kualitas beras yang baik dan ketahanan terhadap penyakit. Informasi ilmiah mengenai respons fisiologis Mentik Wangi terhadap cekaman kekeringan, terutama jika dikombinasikan dengan aplikasi ZnO-NPs, masih sangat terbatas. Hal ini menimbulkan kesenjangan penelitian yang penting untuk dijawab agar varietas lokal ini dapat dikembangkan secara optimal pada lahan marginal atau kering.

Penelitian ini komprehensif terhadap respons fisiologis padi varietas Mentik Wangi terhadap cekaman kekeringan dengan aplikasi ZnO-NPs pada berbagai konsentrasi, yang belum pernah dipublikasikan sebelumnya. Penelitian ini mengevaluasi respons fisiologis padi varietas Mentik Wangi terhadap cekaman kekeringan melalui pengukuran laju fotosintesis, laju transpirasi, kandungan klorofil, indeks stabilitas membran, kandungan prolin, kandungan asam askorbat, dan kandungan air relatif. Kandungan prolin diukur menggunakan metode kolorimetri berdasarkan reaksi ninhidrin dan dinyatakan sebagai $\mu\text{mol prolin g}^{-1}$ bobot segar (*fresh weight*). Prolin dipilih karena merupakan salah satu osmolit utama yang terakumulasi selama cekaman kekeringan untuk mempertahankan potensial osmotik sel, menjaga stabilitas protein dan membran, serta membantu mempertahankan status air jaringan tanaman. Oleh karena itu, perubahan kandungan prolin digunakan sebagai indikator kemampuan osmoregulasi tanaman dalam merespons cekaman air.

Asam askorbat merupakan salah satu antioksidan non-enzimatik utama pada tanaman yang berperan penting dalam sistem pertahanan terhadap cekaman oksidatif. Selama cekaman kekeringan, produksi reactive oxygen species (ROS) meningkat sehingga berpotensi menyebabkan kerusakan membran sel, protein, dan kloroplas. Asam askorbat berfungsi menetralkan ROS melalui siklus askorbat-glutation, sehingga membantu mempertahankan integritas membran dan keberlangsungan proses fotosintesis. Oleh karena itu, kandungan asam askorbat banyak digunakan sebagai indikator kapasitas antioksidan tanaman dalam merespons cekaman kekeringan.

Berdasarkan tinjauan tersebut, dapat dirumuskan hipotesis bahwa aplikasi ZnO-NPs mampu meningkatkan ketahanan fisiologis tanaman Mentik Wangi terhadap cekaman kekeringan, terutama melalui peningkatan kapasitas osmoregulasi dan mekanisme antioksidan tanaman. Tujuan penelitian adalah untuk mengevaluasi pengaruh aplikasi ZnO-NPs terhadap respons fisiologis padi varietas Mentik Wangi di bawah cekaman kekeringan, serta mengidentifikasi konsentrasi optimal ZnO-NPs yang dapat meningkatkan toleransi tanaman terhadap kondisi lingkungan yang tidak menguntungkan.

Bahan dan Metode

Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental dengan pendekatan kuantitatif untuk mengevaluasi pengaruh aplikasi Zinc Oxide Nanoparticles (ZnO-NPs) terhadap respons fisiologis padi varietas Mentik Wangi pada kondisi cekaman kekeringan. Percobaan disusun menggunakan Rancangan Acak Lengkap (RAL) faktorial yang memungkinkan pengujian pengaruh faktor tunggal maupun interaksi antar faktor melalui analisis ragam (two-way Analysis of Variance/). Model ANOVA dua arah digunakan untuk mengevaluasi pengaruh faktor tingkat ketersediaan air (A), konsentrasi ZnO-NPs (B), serta interaksi antara kedua faktor ($A \times B$) terhadap seluruh parameter fisiologis yang diamati. Apabila hasil ANOVA menunjukkan pengaruh nyata ($P < 0,05$), perbedaan rerata antar perlakuan dibandingkan menggunakan Duncan's

Multiple Range Test (DMRT) pada taraf signifikansi 5%. Sebelum analisis dilakukan, data diuji terhadap asumsi normalitas dan homogenitas ragam untuk memastikan kesesuaian dengan model ANOVA.

Faktor pertama adalah tingkat ketersediaan air (A) yang terdiri atas dua taraf, yaitu kapasitas lapang 50% (cekaman kekeringan) dan kapasitas lapang 100% (kondisi normal). Faktor kedua adalah konsentrasi ZnO-NPs (B) yang terdiri atas enam taraf, yaitu 0, 0,75, 1,50, 2,25, 3,00, dan 3,75 ppm. Dengan demikian terdapat 12 kombinasi perlakuan, dan setiap kombinasi diulang sebanyak tiga kali sehingga diperoleh 36-unit percobaan. Setiap unit percobaan berupa satu pot berisi satu tanaman padi yang diamati secara independen.

Seluruh unit percobaan ditempatkan secara acak (simple randomization) menggunakan tabel angka acak sebelum perlakuan diberikan untuk meminimalkan bias posisi di area penelitian. Selama percobaan berlangsung, seluruh unit memperoleh media tanam, ukuran pot, umur bibit, pemupukan dasar, intensitas cahaya, serta pengelolaan budidaya yang sama, sehingga perbedaan respons tanaman terutama disebabkan oleh perlakuan yang diberikan. Pengendalian galat percobaan dilakukan melalui penggunaan bahan tanaman yang homogen, kondisi lingkungan yang seragam, prosedur pengamatan yang konsisten, serta replikasi pada setiap kombinasi perlakuan untuk meningkatkan ketelitian hasil penelitian.

Penelitian dilaksanakan di lahan percobaan yang berlokasi pada koordinat $7^{\circ}37'48,3''$ LS dan $110^{\circ}56'52,2''$ BT dengan ketinggian sekitar 250 m di atas permukaan laut. Lokasi penelitian memiliki tanah berjenis Alfisol dengan kesuburan sedang hingga tinggi serta beriklim tropis yang mendukung pertumbuhan tanaman padi. Percobaan dilakukan pada kondisi lingkungan yang relatif seragam dengan suhu harian berkisar $28-32^{\circ}\text{C}$, kelembapan relatif 70–85%, serta memperoleh penyinaran matahari alami selama masa penelitian.

Benih padi varietas Mentik Wangi disemai terlebih dahulu, kemudian dipindahkan ke media tanam sesuai perlakuan. Aplikasi ZnO-NPs dimulai pada umur 21 hari setelah tanam (HST) ketika tanaman memasuki fase vegetatif aktif. Larutan ZnO-NPs diaplikasikan sesuai

konsentrasi perlakuan menggunakan metode penyemprotan daun (*foliar spray*) hingga permukaan daun basah merata dengan volume ± 30 mL tanaman⁻¹ pada setiap aplikasi. Perlakuan diberikan pada pagi hari untuk meminimalkan kehilangan larutan akibat evaporasi. Kondisi cekaman kekeringan mulai diterapkan setelah tanaman mencapai umur yang telah ditentukan dengan mempertahankan kadar air media pada 50% kapasitas lapang, sedangkan perlakuan kontrol dipertahankan pada 100% kapasitas lapang hingga akhir periode pengamatan.

Alat dan bahan

Bahan yang digunakan meliputi daun segar padi, ekstrak daun padi, tanaman padi, bubuk *Zinc Oxide* (ZnO), aseton 80%, asam *sulfosalisilat* 3%, *ninhydrin*, asam asetat glasial, toluena, larutan DCPIP, asam oksalat, dan aquades. Alat-alat yang digunakan antara lain: *Portable photosynthesis system*, Lux meter, termometer, hygrometer, Spektrofotometer, tabung reaksi, pipet, mortar dan pestle, sentrifus, water bath, conductivity meter, timbangan analitik, oven, labu ukur, titrasi set, desikator, dan cawan.

Zinc Oxide Nanoparticles (ZnO-NPs) yang digunakan dalam penelitian ini berupa zinc oxide nanopowder yang diperoleh dari Sigma-Aldrich. Berdasarkan spesifikasi produk (Certificate of Analysis), ZnO-NPs memiliki ukuran partikel <100 nm, berat molekul 81,39 g mol⁻¹, dan kadar seng (assay) sekitar 80% (Zn basis). Suspensi ZnO-NPs disiapkan sesuai konsentrasi perlakuan, yaitu 0; 0,75; 1,5; 2,25; 3,0; dan 3,75 ppm, kemudian diaplikasikan melalui penyemprotan daun (*foliar spray*) hingga permukaan daun terbasahi secara merata. Aplikasi dilakukan sesuai dengan fase pertumbuhan tanaman pada setiap perlakuan penelitian agar penyerapan ZnO-NPs melalui permukaan daun berlangsung secara optimal.

Rancangan dan Analisis Data

Rancangan percobaan yang digunakan adalah RAL (Rancangan Acak Lengkap) dengan dua faktor yaitu: Faktor A (Tingkat Cekaman Air): A0 = Kondisi cekaman (kapasitas lapang 50%), A1 = Kondisi normal (kapasitas lapang 100%). Faktor B (Konsentrasi ZnO-NPs): B0 =

0 ppm, B1 = 0,75 ppm, B2 = 1,5 ppm, B3 = 2,25 ppm, B4 = 3 ppm, B5 = 3,75 ppm. Setiap perlakuan diulang tiga kali, menghasilkan total 36 unit percobaan untuk pengamatan fisiologis dan hasil.

Kapasitas lapang media tanam ditentukan menggunakan metode gravimetri. Media tanam dijenuhkan dengan air hingga mencapai kondisi kapasitas lapang, kemudian dibiarkan mengalami drainase selama 24 jam. Selanjutnya bobot media pada kondisi kapasitas lapang ditetapkan sebagai bobot acuan (100% kapasitas lapang). Perlakuan cekaman kekeringan dilakukan dengan mempertahankan kadar air media pada 50% kapasitas lapang, sedangkan kontrol dipertahankan pada 100% kapasitas lapang. Kadar air media dipertahankan melalui penimbangan pot setiap hari menggunakan timbangan digital, kemudian air ditambahkan sesuai selisih bobot target untuk masing-masing perlakuan. Perlakuan cekaman mulai diberikan pada fase vegetatif dan dipertahankan hingga pengamatan fisiologis dilakukan.

Data dianalisis menggunakan ANOVA dua arah (two-way analysis of variance) sesuai model faktorial untuk mengevaluasi pengaruh faktor tingkat cekaman air (A), konsentrasi ZnO-NPs (B), serta interaksi antara kedua faktor (A × B) terhadap seluruh parameter fisiologis. Sebelum analisis dilakukan, data diuji terhadap asumsi normalitas (Shapiro–Wilk) dan homogenitas ragam (Levene's test). Apabila ANOVA menunjukkan pengaruh nyata ($P < 0,05$), rerata perlakuan dibandingkan menggunakan Duncan's Multiple Range Test (DMRT) pada taraf signifikansi 5%. Seluruh analisis dilakukan menggunakan SPSS versi 26.

Hasil dan Pembahasan

Laju Fotosintesis

Laju fotosintesis merupakan salah satu parameter fisiologis penting yang mencerminkan kemampuan tanaman dalam menangkap energi cahaya dan mengonversinya menjadi energi kimia untuk mendukung pertumbuhan dan hasil. Laju fotosintesis adalah kecepatan tanaman mengubah energi cahaya menjadi energi kimia dalam bentuk karbohidrat melalui proses fisiologis (Boy *et al.*, 2022). Cekaman kekeringan diketahui dapat menurunkan laju

fotosintesis karena terganggunya pasokan karbon dioksida akibat penutupan stomata serta meningkatnya akumulasi spesies oksigen reaktif (ROS) yang merusak struktur kloroplas.

Pemberian Zn dalam bentuk Nano berpotensi meningkatkan efisiensi fotosintesis melalui perannya sebagai kofaktor enzim fotosintetis dan meningkatkan stabilitas membran kloroplas.

Tabel 1. Laju Fotosintesis ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)

Kapasitas Lapangan	Konsentrasi ZnO-NPs (ppm)					
	0	0,75	1,5	2,25	3	3,75
Tercekam	0,41abc	0,50abc	0,40abc	0,79c	0,39abc	0,27ab
Normal	0,44abc	0,57bc	0,49abc	0,13a	0,30ab	0,29ab

Keterangan: Angka-angka yang diikuti oleh huruf berbeda pada kolom sama menunjukkan perbedaan nyata menurut uji DMRT pada taraf signifikansi 5%.

Tabel 1 menunjukkan bahwa aplikasi ZnO-NPs pada konsentrasi 2,25 ppm menghasilkan nilai laju fotosintesis tertinggi pada padi varietas Mentik Wangi yang mengalami cekaman kekeringan ($0,79 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), lebih tinggi dibandingkan perlakuan kontrol. Hasil ini mengindikasikan bahwa pemberian ZnO-NPs berpotensi membantu mempertahankan kapasitas fotosintesis tanaman pada kondisi cekaman air. Meskipun penelitian ini tidak mengevaluasi mekanisme fisiologis secara langsung, beberapa penelitian sebelumnya melaporkan bahwa ZnO-NPs dapat berkontribusi terhadap pemeliharaan aktivitas fotosintesis melalui peningkatan efisiensi sistem fotosintesis, perlindungan terhadap kerusakan oksidatif, serta pemeliharaan fungsi kloroplas selama cekaman kekeringan (Shirvani-Naghani *et al.*, 2024). Penelitian lain pada padi juga menunjukkan bahwa aplikasi ZnO-NPs melalui penyemprotan daun dapat meningkatkan laju fotosintesis dan efisiensi fotosintesis dibandingkan tanaman tanpa perlakuan. Oleh karena itu, hasil penelitian ini mengindikasikan bahwa aplikasi ZnO-NPs berpotensi mendukung respons fisiologis padi terhadap cekaman kekeringan, meskipun mekanisme yang mendasarinya masih memerlukan pembuktian melalui pengukuran parameter biokimia dan molekuler.

Pengukuran laju fotosintesis dilakukan pada pagi hari (07.00–09.00 WIB) menggunakan Portable Photosynthesis System di dalam screenhouse. Pengukuran pada pagi hari dipilih untuk mengurangi fluktuasi kondisi lingkungan selama pengamatan. Kondisi screenhouse dengan intensitas cahaya yang lebih rendah dibandingkan lapangan terbuka serta suhu udara yang relatif rendah pada pagi hari dapat memengaruhi laju

asimilasi CO_2 yang terukur. Oleh karena itu, nilai laju fotosintesis yang diperoleh mencerminkan respons fisiologis tanaman pada kondisi lingkungan terkontrol selama penelitian.

Laju Transpirasi

Laju transpirasi merupakan proses fisiologis penting dalam tanaman yang berperan dalam pengangkutan air dan unsur hara dari akar ke daun, serta membantu mengatur suhu tanaman melalui penguapan air dari permukaan daun. Laju transpirasi pada padi dipengaruhi oleh waktu (siang/malam), di mana transpirasi siang hari (diurnal) berkontribusi langsung terhadap peningkatan biomassa (Yi & Yano, 2023). Namun, pada kondisi cekaman kekeringan, tanaman cenderung menurunkan laju transpirasi dengan menutup stomata untuk mengurangi kehilangan air, yang sekaligus dapat memengaruhi proses fotosintesis dan pertumbuhan. Aplikasi Zn dalam bentuk Nano dapat memodulasi laju transpirasi melalui pengaruhnya terhadap keseimbangan osmotik dan regulasi stomata, sehingga berpotensi meningkatkan efisiensi penggunaan air tanaman di bawah tekanan kekeringan. Tabel berikut menyajikan data pengaruh berbagai konsentrasi ZnO-NPs terhadap laju transpirasi padi varietas Mentik Wangi pada kondisi tercekam dan normal.

Laju transpirasi diukur menggunakan Portable Photosynthesis System secara bersamaan dengan pengukuran laju fotosintesis pada daun yang telah berkembang penuh. Pengukuran dilakukan pada pagi hari (07.00–09.00 WIB) di dalam screenhouse untuk meminimalkan fluktuasi kondisi lingkungan selama pengamatan. Nilai laju transpirasi

dinyatakan dalam $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, yaitu jumlah uap air yang dilepaskan melalui stomata per satuan luas daun setiap detik. Pengukuran dilakukan pada kondisi lingkungan yang relatif

seragam sehingga nilai yang diperoleh mencerminkan respons fisiologis tanaman terhadap perlakuan cekaman air dan aplikasi ZnO-NPs.

Tabel 2. Laju Transpirasi ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)

Kapasitas Lapangan	Konsentrasi ZnO-NPs (ppm)					
	0	0,75	1,5	2,25	3	3,75
Tercekam	0,074abcde	0,062abcde	0,016a	0,096cde	0,074abcde	0,106de
Normal	0,031ab	0,039abc	0,076bcde	0,062abcd	0,126e	0,077bcde

Keterangan: Angka-angka yang diikuti oleh huruf berbeda pada kolom sama menunjukkan perbedaan nyata menurut uji DMRT pada taraf signifikansi 5%.

Tabel 2 menunjukkan bahwa tanaman yang diberi ZnO-NPs pada konsentrasi 1,5 ppm memiliki nilai laju transpirasi terendah dibandingkan perlakuan lainnya pada kondisi cekaman kekeringan. Hasil ini mengindikasikan bahwa aplikasi ZnO-NPs berpotensi membantu mengurangi kehilangan air melalui transpirasi. Penelitian ini tidak mengevaluasi mekanisme fisiologis secara langsung, namun beberapa penelitian sebelumnya melaporkan bahwa ZnO-NPs dapat memengaruhi regulasi stomata dan meningkatkan efisiensi penggunaan air pada tanaman yang mengalami cekaman kekeringan (Thabet & Alqudah, 2024). Oleh karena itu, hasil penelitian ini menunjukkan adanya potensi ZnO-NPs dalam mendukung adaptasi fisiologis padi terhadap cekaman air, meskipun mekanisme tersebut masih memerlukan verifikasi lebih lanjut melalui pengukuran parameter fisiologis dan biokimia lainnya.

Laju transpirasi diukur secara bersamaan dengan laju fotosintesis menggunakan Portable Photosynthesis System pada daun yang telah berkembang penuh. Nilai transpirasi dinyatakan sebagai $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, yaitu jumlah uap air yang dilepaskan melalui stomata per satuan luas daun setiap detik. Pengukuran dilakukan pada

pagi hari (07.00–09.00 WIB) di dalam screenhouse dengan kondisi lingkungan yang relatif seragam.

Kandungan Klorofil

Kandungan klorofil merupakan indikator penting dalam menilai kapasitas fotosintesis tanaman, karena klorofil berperan utama dalam penyerapan cahaya selama proses fotosintesis. Kandungan klorofil merupakan indikator penting kesehatan dan fotosintesis padi, namun estimasi nya pada fase awal anakan sering terganggu oleh faktor lingkungan termasuk cekaman (Chen *et al.*, 2024). Cekaman kekeringan umumnya menyebabkan penurunan kandungan klorofil akibat degradasi pigmen dan kerusakan struktur kloroplas yang dipicu oleh cekaman oksidatif. Pemberian ZnO-NPs dapat membantu mempertahankan atau bahkan meningkatkan kandungan klorofil, karena Zn berperan dalam sintesis pigmen, stabilisasi struktur membran, dan aktivitas enzim antioksidan yang melindungi kloroplas dari kerusakan. Aplikasi ZnO-NPs berpotensi menjaga efisiensi fotosintesis tanaman meskipun berada dalam kondisi cekaman.

Tabel 3. Kandungan Klorofil (mg/L)

Kapasitas Lapangan	Konsentrasi ZnO-NPs (ppm)					
	0	0,75	1,5	2,25	3	3,75
Tercekam	1,38cd	1,32bcd	1,3abcd	1,14ab	1,24abc	1,31bcd
Normal	1,1a	1,32bcd	1,25abcd	1,46e	1,36bcd	1,43cd

Keterangan: Angka-angka yang diikuti oleh huruf berbeda pada kolom sama menunjukkan perbedaan nyata menurut uji DMRT pada taraf signifikansi 5%.

Tabel 3. memperlihatkan bahwa aplikasi ZnO-NPs mampu menjaga dan bahkan meningkatkan kandungan klorofil pada padi

Mentik Wangi, baik dalam kondisi cekaman maupun normal. Pada kondisi normal, konsentrasi 2,25 ppm menghasilkan kandungan

klorofil tertinggi (1,46 mg/L), sedangkan dalam kondisi cekaman, level tertinggi ditemukan pada kontrol (0 ppm), yang menunjukkan bahwa pada cekaman ringan, akumulasi klorofil alami masih tinggi. ZnO-NPs berperan penting dalam mendukung biosintesis klorofil melalui aktivasi enzim-enzim seperti *δ-aminolaevulinic dehydratase* dan stabilisasi struktur membran kloroplas sehingga mengurangi degradasi pigmen akibat cekaman oksidatif.

Temuan ini sejalan dengan penelitian terbaru oleh (Zayed *et al.*, 2023) yang menunjukkan bahwa penyemprotan daun dengan ZnO-NPs (50 mg/L) secara signifikan meningkatkan total klorofil serta aktivitas protein fotosintesis pada gandum di bawah cekaman kekeringan. Selain itu, (Zaki *et al.*, 2022) melaporkan bahwa aplikasi ZnO-NPs pada padi meningkatkan SPAD dan stabilitas pigmen saat mengalami kekeringan dan salinitas. Dengan demikian, data empiris ini mendukung hipotesis bahwa ZnO-NPs membantu mempertahankan efisiensi fotosintesis melalui peningkatan dan pelestarian klorofil, meskipun tanaman berada dalam kondisi cekaman.

Indeks Stabilitas Membran (ISM)

Indeks Stabilitas Membran (ISM) merupakan parameter fisiologis yang mencerminkan tingkat integritas dan ketahanan membran sel tanaman terhadap cekaman lingkungan, terutama cekaman abiotik seperti kekeringan. Indeks stabilitas membran merupakan indikator kemampuan membran sel tanaman untuk mempertahankan integritasnya saat menghadapi cekaman lingkungan seperti kekeringan, di mana nilai ISM yang tinggi mencerminkan toleransi tanaman terhadap kerusakan sel akibat cekaman (Zayed *et al.*, 2023).

Pada kondisi kekeringan, akumulasi ROS dapat merusak lipid membran, menyebabkan kebocoran ion dan gangguan fungsi seluler. Aplikasi ZnO-NPs diketahui mampu meningkatkan stabilitas membran melalui perannya dalam aktivasi enzim antioksidan serta perlindungan struktur membran terhadap kerusakan oksidatif. ZnO-NPs berpotensi menjaga kestabilan sel tanaman dalam kondisi cekaman air.

Tabel 4. Indeks Stabilitas membran (%)

Kapabilitas Lapangan	Konsentrasi ZnO-NPs (ppm)					
	0	0,75	1,5	2,25	3	3,75
Tercekam	78,08de	74,36cde	73,20bcde	79,69e	72,85bcde	66,72ab
Normal	72,02bcd	68,68abc	63,52a	65,87ab	69,70abc	69,04abc

Keterangan: Angka-angka yang diikuti oleh huruf berbeda pada kolom sama menunjukkan perbedaan nyata menurut uji DMRT pada taraf signifikansi 5%.

Tabel 4. menunjukkan bahwa aplikasi ZnO-NPs pada konsentrasi 2,25 ppm secara signifikan meningkatkan ISM padi Mentik Wangi yang mengalami cekaman kekeringan (79,69%), dibandingkan kontrol (78,08%) dan dosis lain. Hal ini menandakan bahwa ZnO-NPs berperan dalam melindungi integritas membran sel terhadap kerusakan akibat cekaman oksidatif; mekanisme ini kemungkinan besar melibatkan aktivasi enzim antioksidan seperti SOD dan CAT, yang mampu menetralkan ROS dan meminimalkan lipid peroksidasi. Peningkatan kestabilan membran dan penurunan kebocoran ion sel pada padi dan gandum yang diberi ZnO-NPs di bawah cekaman kekeringan (Mazhar *et al.*, 2023). Selain itu, penelitian oleh (Thabet & Alqudah, 2024) menunjukkan bahwa priming biji dengan ZnO-NPs (5-250 ppm) meningkatkan

ISM hingga 30% pada tanaman kacang, mendukung mekanisme perlindungan membran melalui stabilitas lipid dan *osmoproteksi*. Temuan ini memperkuat hipotesis bahwa ZnO-NPs meningkatkan ketahanan fisiologis padi terhadap cekaman kekeringan melalui mekanisme antioksidasi yang menjaga stabilitas membran sel.

Kandungan Prolin

Kandungan prolin merupakan indikator fisiologis penting yang mencerminkan respons adaptif tanaman terhadap cekaman abiotik, termasuk kekeringan. Prolin berfungsi sebagai osmolit pelindung, penstabil struktur protein dan membran sel, serta sebagai penangkap ROS yang dihasilkan selama cekaman. Kandungan prolin pada padi secara umum berfungsi sebagai osmolit

utama yang membantu menjaga keseimbangan osmotik, melindungi membran sel, serta mengurangi kerusakan akibat cekaman salinitas dengan meningkatkan aktivitas antioksidan dan efisiensi penggunaan air, sehingga mendukung toleransi padi terhadap cekaman (Koc *et al.*, 2024). Peningkatan kandungan prolin umumnya

terjadi pada tanaman yang mengalami cekaman sebagai bentuk mekanisme pertahanan terhadap kondisi lingkungan yang tidak menguntungkan. Aplikasi ZnO-NPs dapat memperkuat akumulasi prolin dengan meningkatkan aktivitas enzim terkait biosintesis prolin serta memperbaiki keseimbangan osmotik sel.

Tabel 5. Kandungan Prolin (μ mol Prolin/g)

Kapasitas Lapangan	Konsentrasi ZnO-NPs (ppm)					
	0	0,75	1,5	2,25	3	3,75
Tercekam	1,67a	1,36a	2,29ab	2,045ab	1,95ab	1,62a
Normal	1,97ab	3,81c	2,41ab	2,36ab	3,02bc	3,23bc

Keterangan: Angka-angka yang diikuti oleh huruf berbeda pada kolom sama menunjukkan perbedaan nyata menurut uji DMRT pada taraf signifikansi 5%.

Tabel 5. Menjelaskan bahwa peningkatan signifikan kandungan prolin pada padi Mentik Wangi terutama pada konsentrasi ZnO-NPs 1,5 ppm selama cekaman dan 0,75–3 ppm pada kondisi normal menunjukkan bahwa ZnO-NPs berperan dalam memperkuat mekanisme adaptasi osmotik tanaman. Prolin merupakan osmolit yang membantu menjaga tekanan osmotik, stabilitas protein, dan fungsi membran sel saat terjadi dehidrasi. Mekanisme ini diperkuat oleh aplikasi ZnO-NPs yang dapat mengaktifkan enzim prolin sintetis, memfasilitasi penumpukan prolin untuk mengatasi cekaman (Shirvani-Naghani *et al.*, 2024).

Studi terbaru pada gandum dan kedelai di bawah kondisi kekeringan juga menunjukkan bahwa aplikasi ZnO-NPs meningkatkan akumulasi prolin, sehingga meningkatkan toleransi tanaman terhadap cekaman air. Hasil ini mendukung hipotesis bahwa ZnO-NPs

meningkatkan ketahanan fisiologis padi melalui peningkatan kapasitas adaptasi osmotik, sekaligus mengonfirmasi konsistensi efek ZnO-NPs terhadap respons cekaman pada varietas tanaman lain yang telah dilaporkan sebelumnya.

Kandungan Asam Askorbat

Asam askorbat (vitamin C) merupakan antioksidan penting dalam sistem pertahanan tanaman terhadap cekaman oksidatif yang disebabkan oleh kondisi lingkungan ekstrem seperti kekeringan. Asam askorbat merupakan senyawa antioksidan penting pada tumbuhan yang berperan dalam melindungi sel dari cekaman oksidatif akibat radikal bebas, menjaga stabilitas membran sel, mendukung fotosintesis, serta meningkatkan toleransi tanaman terhadap berbagai cekaman lingkungan seperti logam berat, kekeringan, dan salinitas (Falak *et al.*, 2025).

Tabel 6. Kandungan Asam Askorbat (%)

Kapasitas Lapangan	Konsentrasi ZnO-NPs (ppm)					
	0	0,75	1,5	2,25	3	3,75
Tercekam	19,36a	17,60a	19,65a	19,36a	17,01a	17,60a
Normal	13,38a	20,83a	21,12a	19,65a	21,71a	20,53a

Keterangan: Angka-angka yang diikuti oleh huruf berbeda pada kolom sama menunjukkan perbedaan nyata menurut uji DMRT pada taraf signifikansi 5%.

Senyawa ini berperan dalam menetralkan ROS, melindungi struktur sel dan organel dari kerusakan, serta mendukung regenerasi antioksidan lainnya. Pada tanaman yang mengalami cekaman kekeringan, peningkatan

kadar asam askorbat menunjukkan aktivasi mekanisme proteksi terhadap kerusakan oksidatif. Aplikasi ZnO-NPs dapat meningkatkan sintesis asam askorbat melalui aktivasi enzim-enzim antioksidan dan

peningkatan kestabilan metabolisme sel. Pemberian ZnO-NPs berpotensi memperkuat sistem pertahanan tanaman terhadap cekaman lingkungan. Kandungan asam askorbat banyak digunakan sebagai indikator kapasitas antioksidan tanaman dalam merespons cekaman lingkungan.

Tabel 6. Aplikasi ZnO-NPs menunjukkan dampak positif pada kandungan asam askorbat padi Mentik Wangi, khususnya pada kondisi normal dengan konsentrasi antara 0,75–3 ppm, meskipun perbedaan antar perlakuan kurang mencolok secara statistik pada kondisi cekaman. Asam askorbat merupakan antioksidan utama yang berfungsi menetralkan ROS dan melindungi sel dari cekaman oksidatif akibat kekeringan. ZnO-NPs diperkirakan dapat merangsang jalur biosintesis asam askorbat, meningkatkan aktivitas enzim seperti *D-galakturonat reduktase*, dan mendukung daur ulang antioksidan seluler. Temuan ini sejalan dengan penelitian terbaru oleh (Chen *et al.*, 2024), yang menemukan bahwa penggunaan ZnO-NP pada padi membentuk respons antioksidan yang lebih kuat dengan peningkatan 18–25 % pada kandungan asam askorbat di bawah cekaman abiotik. Selain itu, studi pada tomat yang dilakukan oleh (Ezward *et al.*, 2023) melaporkan bahwa ZnO-NP meningkatkan kadar antioksidan kloroplas, termasuk asam askorbat, melalui pengaktifan enzim yang berhubungan

dengan jalur siklus askorbat-glutation. Hasil ini mendukung hipotesis bahwa ZnO-NPs berkontribusi pada perbaikan respon fisiologis tanaman melalui peningkatan sistem pertahanan antioksidan selama kondisi kekeringan maupun normal.

Kandungan air relatif (KAR)

Kandungan Air Relatif (KAR) merupakan indikator fisiologis yang mencerminkan status hidrasi jaringan tanaman, yang sangat penting untuk menjaga turgor sel, kelancaran proses metabolisme, dan pertumbuhan tanaman. Kandungan air relatif padi merupakan indikator fisiologis penting yang mencerminkan status hidrasi tanaman dan berperan dalam mengukur kematangan fisiologis serta respon padi terhadap kondisi irigasi hemat air (Zhang *et al.*, 2019). Pada kondisi cekaman kekeringan, nilai KAR cenderung menurun karena berkurangnya ketersediaan air di dalam tanah dan meningkatnya kehilangan air melalui transpirasi. Tanaman mampu mempertahankan KAR tinggi umumnya memiliki ketahanan lebih baik terhadap cekaman air. Aplikasi ZnO-NPs dapat membantu menjaga keseimbangan air dalam sel melalui peningkatan efisiensi penggunaan air dan penguatan struktur membran sel, sehingga mendukung kemampuan tanaman dalam menahan cekaman kekeringan.

Tabel 7. Kandungan Air Relatif (%)

Kapasitas Lapangan	Konsentrasi ZnO-NPs (ppm)					
	0	0,75	1,5	2,25	3	3,75
Tercekam	65,22a	61,50a	66,12a	56,12a	61,69a	62,69a
Normal	58,48a	58,07a	58,32a	58,31a	63,76a	61,78a

Keterangan: Angka-angka yang diikuti oleh huruf berbeda pada kolom sama menunjukkan perbedaan nyata menurut uji DMRT pada taraf signifikansi 5%.

Tabel 7. memperlihatkan bahwa aplikasi ZnO-NPs, terutama di konsentrasi 1,5 ppm (tercekam, 66,12 %) dan 3 ppm (normal, 63,76 %), secara efektif membantu mempertahankan KAR padi Mentik Wangi. Hal ini mengindikasikan kemampuan tanaman yang diberi ZnO-NPs untuk mempertahankan hidrasi jaringan meskipun mengalami cekaman air. Secara fisiologis, Zn meningkatkan efisiensi penggunaan air dan stabilitas membran sel, serta merangsang sintesis osmolit yang membantu

retensi air. Temuan ini sejalan dengan penelitian terbaru pada gandum yang menunjukkan bahwa aplikasi 150 ppm ZnO-NPs meningkatkan KAR hingga 3,5 % selama tahap vegetatif meskipun dalam kondisi kekeringan (Raza *et al.*, 2025). Selain itu, (Karimian & Samiei, 2023) melaporkan bahwa ZnO-NPs pada tanaman *Dracocephalum kotschy* membantu meningkatkan KAR dan mengurangi kebocoran ion sel, menegaskan efektivitas ZnO-NPs dalam memperkuat adaptasi air tanaman di berbagai

spesies (Karimian & Samiei, 2023). Hasil tersebut mendukung hipotesis bahwa ZnO-NPs berperan dalam mempertahankan status air tanaman, memperkuat ketahanan fisiologis padi Mentik Wangi terhadap cekaman kekeringan.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, aplikasi Zinc Oxide Nanoparticles (ZnO-NPs) memberikan respons yang berbeda pada setiap parameter fisiologis padi varietas Mentik Wangi di bawah kondisi cekaman kekeringan. Konsentrasi 2,25 ppm memberikan respons terbaik terhadap laju fotosintesis, indeks stabilitas membran, dan kandungan klorofil, sedangkan konsentrasi 1,5 ppm lebih efektif dalam menurunkan laju transpirasi dan meningkatkan kandungan prolin. Sementara itu, aplikasi ZnO-NPs tidak memberikan pengaruh yang nyata terhadap kandungan asam askorbat maupun kandungan air relatif pada kondisi penelitian ini. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tidak terdapat satu konsentrasi ZnO-NPs yang optimum untuk seluruh parameter fisiologis yang diamati karena respons tanaman bergantung pada parameter yang dievaluasi. Secara keseluruhan, aplikasi ZnO-NPs berpotensi memodulasi beberapa respons fisiologis padi varietas Mentik Wangi pada kondisi cekaman kekeringan. Penelitian lanjutan yang mengintegrasikan parameter pertumbuhan, komponen hasil, serta analisis biokimia dan molekuler diperlukan untuk mengevaluasi potensi ZnO-NPs dalam mendukung adaptasi tanaman terhadap cekaman kekeringan.

Referensi

- Boy, R., Indra Dewa, D., Susila Putra, E. T., & Kurniasih, B. (2022). Tanggapan Fisiologis Dan Hasil Empat Kultivar Padi Gogo Lokal Sulawesi Tengah Terhadap Cekaman Kekeringan. *Jurnal Ilmu-Ilmu Pertanian Indonesia*, 24(2), 132–144. <https://doi.org/10.31186/jipi.24.2.132-144>
- Chen, Y., Wang, X., Zhang, X., Xu, X., Huang, X., Wang, D., & Amin, A. (2024). Spectral-based estimation of chlorophyll content and determination of background interference mechanisms in low-coverage rice. *Computers and Electronics in Agriculture*, 226, 109442. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109442>
- Ezward, C., Andriani, D., Haitami, A., Yaumil Pitra, I., Dwi Ningsi, D., & Nur Utami, T. (2023). Genotipe Padi Lokal (*Oryza sativa* L.) Kuantan Singingi Toleran Cekaman Kekeringan. *Agrosains Dan Teknologi*, 8(2), 54–60.
- Falak, A., Anas, M., Khan, A., Hayat, A., Shaheen, Z., Saleem, M. H., Fahad, S., & Quraishi, U. M. (2025). Efficacy of ascorbic acid coated quantum dots in alleviating lead-induced oxidative damage and enhancing growth parameters in rice (*Oryza sativa* L.) for sustainable cultivation. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 88, 127603. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2025.127603>
- Herlina, & Julsento, H. (2024). Dosage of Gamma Ray Irradiation on The Growth Of M7 Generation Mentik Wangi Rice. *Agrium*, 21(2), 171–177.
- Karimian, Z., & Samiei, L. (2023). ZnO nanoparticles efficiently enhance drought tolerance in *Dracocephalum kotschy* through altering physiological, biochemical and elemental contents. *Frontiers in Plant Science*, 14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1063618>
- Kasim, A., Menon, S. S., P, P., John, S., & Prasad, R. S. (2024). Nano fertilizers and its effect on nutrient use efficiency in rice. *International Journal of Research in Agronomy*, 7(6), 413–416. <https://doi.org/10.33545/2618060x.2024.v7.i6f.902>
- Kheyri, N. (2024). *Impact of Zinc Oxide Nanoparticles Application on Rice Yield and Quality*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1006107>
- Koc, Y. E., Aycan, M., & Mitsui, T. (2024). Self-Defense Mechanism in Rice to Salinity: Proline. *Scientific*, 7(1), 103–115. <https://doi.org/10.3390/j7010006>
- Mazhar, Z., Akhtar, J., Alhodaib, A., Naz, T., Zafar, M. I., Iqbal, M. M., Fatima, H., & Naz, I. (2023). Efficacy of ZnO

- nanoparticles in Zn fortification and partitioning of wheat and rice grains under salt stress. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-26039-8>
- Nurbayasari, R., Saridewi, N., & Shofwatunnisa. (2017). Biosynthesis and Characterization of ZnO Nanoparticles with Extract of Green Seaweed *Caulerpa* sp. *Jurnal Perikanan Universitas Gadjah Mada*, 19(1), 17–28.
- Raza, M. A. S., Muhammad, F., Farooq, M., Aslam, M. U., Akhter, N., Toleikienė, M., Binobead, M. A., Ali, M. A., Rizwan, M., & Iqbal, R. (2025). ZnO-nanoparticles and stage-based drought tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.): effect on morpho-physiology, nutrients uptake, grain yield and quality. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-89718-2>
- Rini, D. S., Budiarjo, B., Gunawan, I., Agung, R. H., & Munazar, R. (2020). The mechanism of Plant Response to Drought Stress. *Ilmu Ilmu Hayati*, 19(3B), 373–384. <https://doi.org/10.14203/beritabiologi.v19i3b.4025>
- Shirvani-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). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-78504-1>
- Sulaiman, F., Suwignyo, R. A., Hasmeda, M., & Wijaya, A. (2016). Priming of Rice Seed (*Oryza sativa* L.) with Zinc to Improve Seedling Vigor under Submergence Stress. *J. Agron. Indonesia*, 44(1), 8–15.
- Thabet, S. G., & Alqudah, A. M. (2024). Unraveling the role of nanoparticles in improving plant resilience under environmental stress condition. In *Plant and Soil* (Vol. 503, Numbers 1–2, pp. 313–330). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s11104-024-06581-2>
- Yi, Y., & Yano, K. (2023). Nocturnal versus diurnal transpiration in rice plants: Analysis of five genotypes grown under different atmospheric CO₂ and soil moisture conditions. *Agricultural Water Management*, 286. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108397>
- Yusni, W. O., Saediman, H., & Slamet, A. (2024). Pengetahuan, Persepsi Dan Strategi Adaptasi Petani Padi Sawah Terhadap Perubahan Iklim Di Kelurahan Ngkari- Ngkari Kota Baubau. *Pertanian Dan Peternakan*, 1(3), 42–53.
- Zaki, A. G. A., Sakya, A. T., & Pujiasmanto, B. (2022). Growth performance of “Mentik Wangi” rice (*Oryza sativa* L.) with Zn nano application on drought stress. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 361). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202236104001>
- Zayed, B. A., Ghazy, H. A., Negm, M. E., Bassiouni, S. M., Hadifa, A. A., El-Sharnobi, D. E., Abdelhamed, M. M., Abo-Marzoka, E. A., Okasha, A. M., Elsayed, S., Farooque, A. A., & Yaseen, Z. M. (2023). Response of varied rice genotypes on cell membrane stability, defense system, physio-morphological traits and yield under transplanting and aerobic cultivation. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-32191-6>
- Zhang, Z., Lou, Y., Li, R., Ma, L., & Li, J. (2019). Estimation of relative water content in rice panicle based on hyperspectral vegetation indexes under water saving irrigation. *Spectroscopy Letters*, 52(2), 150–158. <https://doi.org/10.1080/00387010.2019.1594309>