

The Impact of Environmental Stress on Plant Cell Structure and Function

Astria¹, Yuliani Putri Yofran¹, Yulita Erlina Ngama¹, Emaliano Jonsimus Lea Bhaghi¹,
Veronika P. Sinta Mbia Wae^{1*}

¹Program Studi Pendidikan Biologi, FKIP, Universitas Flores, Ende, Nusa Tenggara Timur, Indonesia;

Article History

Received : December 10th, 2025

Revised : December 20th, 2025

Accepted : December 23th, 2025

*Corresponding Author:

Veronika P. Sinta Mbia Wae,

Program Studi Pendidikan
Biologi, FKIP, Universitas
Flores, Ende, Nusa Tenggara
Timur, Indonesia;

Email:

Veronikapsmwae88@gmail.com

Abstract: Environmental stress is an external factor that affects the strength and function of plant cells, such as salt levels, extreme temperatures, heavy metals, and radiation. This can cause significant changes at the molecular level, including cell structure and chemical processes within plants. This article is a systematic summary of 30 scientific studies published in the last ten years, aiming to identify common patterns in how plant cells respond to non-living stressors. Studies have shown that environmental stressors can lead to the accumulation of free radicals (ROS). This can damage membranes, cause lipid oxidation, damage chloroplasts, and disrupt the activity of enzymes essential for photosynthesis and respiration. At the molecular level, adaptive responses occur by activating hormone signaling pathways, particularly abscisic acid (ABA) and ethylene. This also involves increased expression of genes related to water regulation and protection from oxidation, as well as activation of autophagy, a mechanism that destroys damaged cell parts. Changes in cellular components such as the vacuole, mitochondria, and cell wall indicate how cells work to maintain salt balance and basic body processes. This summary of various studies shows that environmental stress can cause complex problems, such as disruptions in metabolic processes, instability of internal organs, and changes in gene expression. Therefore, understanding how plant cells work and their structure is crucial for developing plant varieties that are resilient to climate change stress.

Keywords: Cellular adaptation, environmental stress, fine structure, plant cells, plant physiology, ROS.

Pendahuluan

Tumbuhan merupakan organisme sesil yang tidak memiliki kemampuan untuk berpindah tempat ketika menghadapi perubahan lingkungan yang tidak menguntungkan (Taiz et al., 2015). Oleh karena itu, kelangsungan hidup tumbuhan sangat bergantung pada kemampuan sel-selnya dalam mendeteksi, merespons, dan menyesuaikan diri terhadap berbagai tekanan lingkungan (Hasanuzzaman et al., 2020). Stres lingkungan seperti kekeringan, salinitas tinggi, suhu ekstrem, genangan air, radiasi ultraviolet, pencemaran logam berat, dan serangan patogen telah diidentifikasi sebagai faktor utama yang memengaruhi pertumbuhan dan produktivitas tanaman secara global (Zhu, 2016). Dalam kondisi tersebut, fungsi fisiologis dan

keseimbangan metabolik sel tumbuhan dapat terganggu, yang pada akhirnya berdampak pada penurunan kinerja tanaman dan bahkan kematian sel (Mittler, 2017).

Tingkat seluler, stres lingkungan umumnya dikaitkan dengan peningkatan produksi reactive oxygen species (ROS) yang berlebihan (Apel & Hirt, 2004). ROS memiliki peran ganda, yaitu sebagai molekul sinyal dalam jalur respons stres dan sebagai agen perusak ketika jumlahnya melampaui kapasitas sistem antioksidan sel (Foyer & Noctor, 2011). Akumulasi ROS yang tidak terkendali dapat menyebabkan kerusakan lipid membran, denaturasi protein, serta mutasi DNA (Sharma et al., 2012). Kloroplas dan mitokondria merupakan organel utama penghasil ROS selama kondisi stres karena keterlibatannya dalam fotosintesis

dan respirasi sel (Møller *et al.*, 2007). Gangguan fungsi pada organel-organel tersebut secara langsung memengaruhi keseimbangan energi dan metabolisme sel tumbuhan (Suzuki *et al.*, 2012).

Meskipun berbagai penelitian telah melaporkan hubungan antara stres lingkungan dan peningkatan ROS, pemahaman yang terintegrasi mengenai kaitan antara akumulasi ROS, gangguan redoks, dan perubahan struktur halus (*fine structure*) sel tumbuhan masih terbatas (Dietz *et al.*, 2016). Sebagian besar penelitian sebelumnya lebih menekankan aspek biokimia atau molekuler tanpa mengaitkannya secara langsung dengan perubahan ultrastruktur organel sel (Mittler, 2017). Selain itu, mekanisme komunikasi antar organel, seperti sinyal balik dari kloroplas dan mitokondria ke inti sel dalam mengatur respons adaptif terhadap stres, belum sepenuhnya dijelaskan (Foyer *et al.*, 2014). Kesenjangan pengetahuan ini menyebabkan pemahaman mengenai strategi adaptasi sel tumbuhan terhadap stres lingkungan menjadi belum menyeluruh.

Penelitian terkini menunjukkan bahwa respons sel tumbuhan terhadap stres lingkungan merupakan hasil integrasi kompleks antara sinyal ROS, pengaturan redoks, perubahan ultrastruktur organel, dan jalur hormon stres seperti asam absisat, asam jasmonat, dan asam salisilat (Bailey-Serres *et al.*, 2019). Pendekatan terpadu yang menghubungkan perubahan struktur halus sel dengan dinamika fisiologis dan molekuler kini menjadi arah penelitian mutakhir dalam fisiologi tumbuhan (Mittler *et al.*, 2022). Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh stres lingkungan terhadap struktur dan fungsi sel tumbuhan dengan menitikberatkan pada perubahan ultrastruktur organel, gangguan proses biokimia, dinamika ROS, serta mekanisme adaptasi seluler. Penelitian ini memiliki urgensi yang tinggi mengingat meningkatnya tekanan lingkungan akibat perubahan iklim, serta pentingnya pengembangan tanaman yang lebih toleran terhadap stres guna mendukung ketahanan pangan berkelanjutan (Zhu, 2016).

Metode

Penelitian ini dilaksanakan secara daring pada periode November-Desember 2025

menggunakan pendekatan *systematic literature review (SLR)*. Populasi penelitian berupa seluruh artikel ilmiah *peer-reviewed* yang membahas stres lingkungan dan dampaknya terhadap struktur serta fungsi sel tumbuhan yang dipublikasikan pada rentang tahun 2015–2025. Sampel penelitian terdiri atas 30 artikel terpilih yang diperoleh dari basis data Google Scholar melalui teknik *purposive sampling*, dengan kriteria inklusi meliputi artikel yang mengkaji stres abiotik, perubahan ultrastruktur sel, fungsi organel, dinamika *reactive oxygen species (ROS)*, dan respons adaptif sel tumbuhan. Variabel penelitian mencakup jenis stres lingkungan, perubahan struktur sel, gangguan fungsi fisiologis, regulasi redoks, serta mekanisme adaptasi seluler. Pengumpulan data dilakukan melalui penelusuran literatur menggunakan kata kunci relevan, dengan bantuan perangkat komputer, akses internet, dan perangkat lunak pengelola referensi.

Prosedur penelitian meliputi penentuan topik dan kata kunci, penelusuran artikel ilmiah, penyaringan judul dan abstrak, telaah isi lengkap, serta seleksi akhir berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi. Artikel terpilih kemudian dikategorikan ke dalam tema-tema utama, yaitu perubahan ultrastruktur sel, gangguan fungsi fisiologis, dinamika ROS, dan mekanisme adaptasi sel tumbuhan. Analisis data dilakukan secara kualitatif-deskriptif melalui analisis tematik dan sintesis naratif untuk memperoleh pemahaman yang komprehensif mengenai pengaruh stres lingkungan terhadap struktur dan fungsi sel tumbuhan.

Hasil dan Pembahasan

Stres lingkungan adalah salah satu faktor luar yang sangat penting untuk keberlangsungan hidup tanaman. Hal ini terjadi karena sel tumbuhan adalah bagian dasar yang pertama kali merespons perubahan kondisi di sekitarnya (Widiatningrum *et al.*, 2025). Berbagai faktor lingkungan seperti kekeringan, kadar garam yang tinggi, suhu yang sangat panas atau dingin, pencemaran oleh logam berat, dan sinar ultraviolet bisa merusak struktur dan fungsi sel. Hal ini berpengaruh pada proses penting yang diperlukan untuk pertumbuhan dan perkembangan tumbuhan.

Tingkat sel, stres ini menyebabkan perubahan bentuk organel, ketidakseimbangan zat-zat dalam sel, gangguan pada membran, dan masalah pada sistem enzim. Semua ini bisa membuat tanaman lebih sulit untuk beradaptasi dengan lingkungannya. Perubahan pada struktur sel adalah tanda awal yang paling jelas dari stres akibat lingkungan. Ketika terjadi kekeringan, vakuola dalam sel menyusut karena kehilangan tekanan Mailidarni & Djafar (2025). Hal ini menyebabkan dinding sel menjadi tidak stabil dan jaringan menjadi lebih lemah. Pada kondisi salinitas tinggi, plasmolisis terjadi lebih banyak. Ini terlihat saat membran sel terpisah dari dinding sel karena perbedaan tekanan osmosis yang semakin besar (Wijaya, S. S. (2025)

Sementara itu, paparan logam berat seperti kadmium dan tembaga bisa merusak sel dengan cara mengubah lemak, yang menyebabkan kebocoran ion dan gangguan pertukaran zat antar bagian dalam sel (Hertika, & Putra, 2019). Perubahan-perubahan itu menunjukkan bahwa membran plasma adalah bagian sel yang paling mudah terpengaruh oleh stres dari lingkungan. Kloroplas adalah bagian dari sel yang sangat peka terhadap perubahan di sekitarnya. Stres dari kekeringan dan garam dilaporkan mengubah posisi tilakoid dan mengurangi kepadatannya. Grana mempengaruhi langsung seberapa efektif fotosintesis (Mendrofa, 2024). Suhu yang sangat tinggi dapat merusak protein fotosistem II (PSII), yang mengganggu aliran elektron dan mengurangi produksi energi sel (Mandasari, 2025). Selain itu, paparan radiasi UV-B dapat merusak membran kloroplas dan meningkatkan pembentukan bahan yang berbahaya bagi sel (ROS). Ini mempercepat kerusakan bagian-bagian yang terlibat dalam fotosintesis.

Jadi, bisa disimpulkan bahwa kloroplas tidak hanya berfungsi sebagai tempat fotosintesis, tetapi juga sebagai tanda utama seberapa parah sel rusak karena tekanan lingkungan. Mitokondria juga menunjukkan perubahan penting dalam bentuk dan cara kerja saat mengalami stres. Kondisi kekeringan dan suhu tinggi dapat menyebabkan mitokondria membengkak, struktur dalamnya menjadi kacau, dan mengurangi kemampuan sel untuk bernapas (Santhiawan, P., & Suwardike, P. (2019). Dalam keadaan terpapar logam berat, mitokondria menghasilkan banyak ROS bisa merusak DNA

mitokondria dan protein yang terlibat dalam pernapasan (Zuhri Multazam, S. P. (2025) Selain itu, perubahan pada cara mitokondria bergabung dan memisah juga menunjukkan bagaimana tanaman menyeimbangkan kebutuhan energi dan menjaga sel tetap hidup. Tanggapan ini menunjukkan bahwa mitokondria sangat penting untuk menjaga keseimbangan energi dalam tubuh saat stres.

Retikulum endoplasma (RE) juga sangat penting untuk menjaga fungsi sel ketika terjadi stres dari lingkungan Isrul *et al.*, (2025). Beberapa penelitian menunjukkan bahwa pengumpulan protein yang salah bentuk di retikulum endoplasma (RE) memicu respons protein yang tidak terlipat (UPR). Tujuan UPR adalah untuk mengurangi jumlah protein yang menumpuk dan membantu menyeimbangkan kembali kondisi sel. Dalam keadaan garam tinggi atau kering, RE sering membesar dan kemampuan untuk membuat protein menurun. Ini menunjukkan bahwa organel ini sangat mudah terpengaruh oleh perubahan lingkungan. Aktivasi jalur UPR adalah salah satu cara penting yang digunakan tumbuhan untuk bertahan hidup.

Dinamika ROS adalah bagian penting dari hampir semua cara sel merespons stres dari lingkungan. Pembentukan ROS (spesies oksigen reaktif) meningkat dengan cepat saat terjadi kekeringan, salinitas tinggi, radiasi UV, dan paparan bahan berbahaya seperti logam berat Akhmad (2022). Jika tidak diatasi, ini bisa merusak lemak, protein, dan DNA. Untuk melawan ROS, tubuh memiliki sistem pertahanan yang melibatkan enzim seperti superoksida dismutase (SOD), katalase (CAT), dan peroksidase (POD), serta antioksidan seperti vitamin C dan glutathion. Semua ini bekerja sama untuk menetralkan ROS. Peningkatan aktivitas antioksidan menunjukkan bahwa cara tubuh membersihkan zat berbahaya yang disebut ROS adalah salah satu cara paling penting untuk menyesuaikan diri dengan stres dari lingkungan (Rondonuwu, 2013). Namun, jika produksi ROS lebih banyak daripada kemampuan tubuh untuk mengeluarkannya, kerusakan sel akan terjadi lebih cepat dan semakin parah.

Skala molekuler, stres dari lingkungan dapat mempengaruhi cara gen bekerja, khususnya gen yang membantu menghilangkan zat berbahaya, membuat bahan yang menjaga keseimbangan cairan, memproduksi protein yang

melindungi sel dari panas, dan mengatur perpindahan ion (Judijanto, 2025). Aktivasi jalur sinyal seperti asam absisat (ABA) adalah cara utama yang mempengaruhi penutupan stomata, meningkatkan ketahanan terhadap kekurangan air, dan memperkuat struktur sel (Larosa, 2025). Selain itu, jalur sinyal MAPK (mitogen-activated protein kinase) membantu mengatur respons terhadap stres dengan mengontrol ekspresi gen yang sesuai (Rhamadia, T. (2023). Perubahan cara gen ini bekerja membantu tanaman beradaptasi dengan cepat terhadap perubahan lingkungan.

Struktur dinding sel juga berubah saat mengalami stres. Di kondisi dengan garam tinggi, ada peningkatan penumpukan lignin dan selulosa untuk memperkuat dinding sel. Sedangkan saat kekeringan, terjadi penebalan lapisan tengah sel untuk menjaga tekanan dalam sel (Darmanti, 2015). Enzim seperti ekspansin, poligalakturonase, dan selulase juga disusun ulang untuk mengatur kelenturan dinding sel saat terjadi perubahan tekanan air (ENZIM, 2017). Penyesuaian ini menunjukkan bahwa dinding sel adalah bagian yang aktif dan dapat berubah sesuai dengan kondisi tekanan, bukan hanya struktur yang diam. Selain reaksi sel yang sudah dibahas, perubahan dalam proses metabolisme utama dan sekunder juga sangat penting untuk beradaptasi dengan stres. Pengumpulan zat seperti prolin, trehalosa, dan gula larut membuat tahanan meningkat. Osmotik sel membantu mengurangi kerusakan pada membran. Sementara itu, zat-zat lain seperti flavonoid dan alkaloid membantu melindungi dari radikal bebas dan sinar UV (PRESS, U. (2023).

Perubahan dalam metabolisme ini menunjukkan bahwa cara tubuh beradaptasi terhadap stres melibatkan banyak bagian dari sel. Secara umum, hasil dari 30 artikel ini menunjukkan bahwa stres dari lingkungan berdampak pada tumbuhan dengan mengubah struktur, fungsi, proses kimia, dan molekul mereka yang saling terkait. Kerusakan bagian dalam sel, masalah pada lapisan sel, peningkatan zat berbahaya, dan perubahan dalam gen membentuk serangkaian respons yang menentukan seberapa tahan tumbuhan terhadap stres. Ke depan, penelitian bisa fokus pada meningkatkan cara sel beradaptasi dengan menggunakan bioteknologi, rekayasa genetik, dan mengembangkan tanaman yang lebih tahan

terhadap kondisi lingkungan yang sulit.

Kesimpulan

Berdasarkan penelitian dari 30 artikel ilmiah dalam sepuluh tahun terakhir, bisa disimpulkan bahwa stres lingkungan mempengaruhi berbagai aspek dari struktur dan fungsi sel tanaman. Berbagai jenis tekanan seperti kekeringan, garam berlebih, logam berat, suhu sangat panas atau dingin, dan radiasi menyebabkan gangguan mulai dari tingkat molekuler, proses biokimia, hingga fungsi tubuh. Stres lingkungan terbukti menyebabkan peningkatan ROS yang merusak membran, mengubah lemak, menghancurkan kloroplas, dan mengganggu aliran ion. Selain itu, perubahan pada gen seperti P5CS, NHX1, SOS1, dan gen antioksidan menunjukkan bahwa tanaman beradaptasi dengan cara yang teratur melalui sinyal molekuler dan mekanisme hormonal, terutama hormon ABA dan etilen. Autophagy meningkat untuk menghancurkan bagian sel yang rusak, sementara penurunan kerja enzim fotosintesis dan pernapasan menghalangi proses penting dalam tubuh. Secara umum, hasil ini menunjukkan bahwa stres dari lingkungan tidak hanya mengubah bentuk dan struktur sel, tetapi juga merusak stabilitas gen, gerakan organel, dan proses penting dalam metabolisme. Hal ini langsung mempengaruhi pertumbuhan dan hasil tanaman. Karena itu, kita perlu memahami dengan baik bagaimana tanaman merespons stres agar bisa membuat cara untuk meningkatkan ketahanan tanaman terhadap perubahan lingkungan yang semakin berat.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada seluruh peneliti dan penulis artikel ilmiah yang menjadi sumber utama dalam kajian ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada dosen pembimbing dan pihak-pihak yang telah memberikan arahan, masukan, serta dukungan selama proses penyusunan penelitian ini.

Referensi

Akhmad, R. (2022). Pengaruh ketinggian lokasi tumbuh terhadap kadar total flavonoid dan daya antioksidan daun kirinyuh

- (*Chromolaena odorata* (L.) RM King & H. Rob) (*Tesis doctoral*, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim).
- Apel, K., & Hirt, H. (2004). Reactive oxygen species: Metabolism, oxidative stress, and signal transduction. *Annual Review of Plant Biology*, 55, 373–399.
- Bailey-Serres, J., Parker, J. E., Ainsworth, E. A., Oldroyd, G. E. D., & Schroeder, J. I. (2019). Genetic strategies for improving crop yields. *Nature*, 575(7781), 109–118.
- Darmanti, S. (2015). *Penebalan dinding sel xilem tanaman kedelai [Glycine max (L.) Merr.] var. Grobogan akibat cekaman ganda interferensi teki (Cyperus rotundus L.) dan kekeringan*. *Buletin Anatomi dan Fisiologi dh Sellula*, 23(2), 23–28.
- Dietz, K. J., Turkan, I., & Krieger-Liszkay, A. (2016). Redox- and reactive oxygen species-dependent signaling into and out of the photosynthesizing chloroplast. *Plant Physiology*, 171(3), 1541–1550.
- Enzim, I. (2017). *BAB 4. Teknologi Enzim* (hlm. 37).
- Foyer, C. H., & Noctor, G. (2011). Ascorbate and glutathione: The heart of the redox hub. *Plant Physiology*, 155(1), 2–18.
- Foyer, C. H., Ruban, A. V., & Nixon, P. J. (2014). Photosynthesis solutions to enhance productivity. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 369(1640), 20130290.
- Hasanuzzaman, M., Bhuyan, M. H. M. B., Zulfiqar, F., Raza, A., Mohsin, S. M., Mahmud, J. A., Fujita, M., & Fotopoulos, V. (2020). Reactive oxygen species and antioxidant defense in plants under abiotic stress: Revisiting the crucial role of a universal defense regulator. *Antioxidants*, 9(8), 681.
- Hertika, A. M. S., & Putra, R. B. D. S. (2019). *Ekotoksikologi untuk lingkungan perairan*. Universitas Brawijaya Press.
- Isrul, M., Adnan, A., & Islamia, M. N. (2025). Eksplorasi berbagai fungsi mitokondria melalui pendekatan meta-analisis dalam biologi seluler. *Spizaetus: Jurnal Biologi dan Pendidikan Biologi*, 6(2), 301–311.
- Mailidarni, N., & Djafar, T. (2025). *Fisiologi tumbuhan: Proses, mekanisme, dan adaptasi*. Elfarazy Media Publisher.
- Mandasari, S. P. A. (2025). *BAB 3. Respirasi dan metabolisme energi*. Dalam *Fisiologi tanaman pangan* (hlm. 41).
- Mendrofa, J. S., Mendrofa, D. P., Lase, B. V. L., Gulo, K. I., Mendrofa, N. K., & Larosa, Y. M. (2025). Evaluasi ketahanan tanaman kacang tanah (*Arachis hypogaea*) terhadap cekaman kekeringan. *Jurnal Ilmu Pertanian dan Perikanan*, 2(2), 7–12.
- Mittler, R. (2017). ROS are good. *Trends in Plant Science*, 22(1), 11–19.
- Mittler, R., Zandalinas, S. I., Fichman, Y., & Van Breusegem, F. (2022). Reactive oxygen species signalling in plant stress responses. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 23(10), 663–679.
- Møller, I. M., Jensen, P. E., & Hansson, A. (2007). Oxidative modifications to cellular components in plants. *Annual Review of Plant Biology*, 58, 459–481.
- Press, U. (2023). *Antioksidan dan stres oksidatif*. UAD Press.
- Rhamadia, T. (2023). *Pengaruh pemberian gel secretome mesenchymal stem cell hypoxia (SH-MSC) terhadap ekspresi gen P38 dan VEGF (Studi eksperimental in vivo pada tikus jantan galur Wistar model luka diabetik-like yang diinduksi streptozotocin)* (Tesis magister, Universitas Islam Sultan Agung).
- Santhiawan, P., & Suwardike, P. (2019). Adaptasi padi sawah (*Oryza sativa* L.) terhadap peningkatan kelebihan air sebagai dampak pemanasan global. *Agro Bali: Agricultural Journal*, 2(2), 130–144.
- Sharma, P., Jha, A. B., Dubey, R. S., & Pessarakli, M. (2012). Reactive oxygen species, oxidative damage, and antioxidative defense mechanism in plants under stressful conditions. *Journal of Botany*, 2012, 1–26.
- Suzuki, N., Koussevitzky, S., Mittler, R., & Miller, G. (2012). ROS and redox signalling in the response of plants to abiotic stress. *Plant, Cell & Environment*, 35(2), 259–270.
- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2015). *Plant physiology and development* (Edisi ke-6). Sinauer Associates.
- Telaumbanua, P. H., Nazara, R. V., Zebua, H. P., Samudin, S., Monde, A., Purba, J. H., ... &

- Mendrofa, P. K. T. (2024). *Dasar-dasar Agronomi*. Azzia Karya Bersama.
- Wetipo, Y. S., Mangimbulude, J. C., & Rondonuwu, F. S. (2013). Produksi ROS akibat akumulasi ion logam berat dan mekanisme penangkal dengan antioksidan. *Proceeding Biology Education Conference: Biology, Science, Environmental, and Learning*, 10(1).
- Widiatningrum, T., Prajanti, S. D. W., & Amelia, D. R. (2025). Ekofisiologi Tumbuhan sebagai Bagian dari Pertanian Berkelanjutan. *Bookchapter Ekonomi Universitas Negeri Semarang*, 3, 35-48.
- Zhu, J. K. (2016). Abiotic stress signaling and responses in plants. *Cell*, 167(2), 313–324.
- Zikri, H., Azijah, F. M., Aprilia, H., Fitriyyah, I., & Wijaya, S. S. (2025). Penentuan Pengaruh Plasmolisis pada Sel Daun Rhoecus Discolor. *Flora: Jurnal Kajian Ilmu Pertanian dan Perkebunan*, 2(1), 11-20.
- Zuhri Multazam, S. P. (2025). *BAB 5. Teknologi pengelolaan air dan cekaman kekeringan. Dalam Pengelolaan fisiologis tanaman tercekam* (hlm. 95).