Insight of Biology
Vol. 2 No. 1, March 2026, pp. 9-16
E-ISSN 3109-1164

Pengaruh Konsentrasi Mikroplastik terhadap Aktivitas Enzim Antioksidan dan Pertumbuhan Chlorella vulgaris dalam Sistem Kultur Terkontrol

Dewi Kartika Sari [a,1,*],Ahmad Rahman [b,2]
[a] Fakultas Sains, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia
[b] Fakultas Biologi, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia
[1] dewi.sari@ugm.ac.id

ARTICLE INFO

Article history
Received December 15, 2025
Revised February 16, 2026
Accepted March 05, 2026
Published March 17, 2026

Keywords
Microplastics
Chlorella vulgaris
oxidative stress
antioxidant enzymes
growth

License by CC-BY-SA
Copyright © 2025, The Author(s).

ABSTRACT

The increasing accumulation of microplastics in aquatic environments poses a significant threat to photosynthetic organisms, including the microalga Chlorella vulgaris. This study aims to analyze the effects of varying microplastic concentrations on antioxidant enzyme activity and growth of C. vulgaris under controlled culture conditions. The experiment applied environmentally relevant and sub-lethal concentrations of microplastics. Observed parameters included growth rate, chlorophyll content, and antioxidant enzyme activities such as superoxide dismutase (SOD) and catalase (CAT). The results show that increasing microplastic concentrations reduced growth rate by more than 35% at higher exposure levels and significantly elevated antioxidant enzyme activity as a response to oxidative stress. SOD and CAT activities increased by approximately 1.8–2.3 times compared to the control, indicating the accumulation of reactive oxygen species. In addition, microplastics disrupted photosynthetic processes and cellular energy metabolism. These findings demonstrate that microplastics act as environmental stressors that trigger physiological and biochemical responses in C. vulgaris. This study highlights the importance of assessing microplastic risks to primary producers in aquatic ecosystems and their implications for food web stability.

How to cite: Sari, D. K., & Rahman, A. (2026). Pengaruh Konsentrasi Mikroplastik terhadap Aktivitas Enzim Antioksidan dan Pertumbuhan Chlorella vulgaris dalam Sistem Kultur Terkontrol. *Insight of Biology, 2*(1), 9-16. doi: https://doi.org/10.70716/inbio.v2i1.438

PENDAHULUAN

Pencemaran mikroplastik telah menjadi isu lingkungan global yang meningkat secara signifikan dalam satu dekade terakhir. Mikroplastik didefinisikan sebagai partikel plastik berukuran kurang dari 5 mm yang berasal dari degradasi plastik makro maupun sumber primer seperti mikrogranul industri. Partikel ini ditemukan secara luas di ekosistem perairan, baik air tawar maupun laut, dengan konsentrasi yang terus meningkat akibat aktivitas antropogenik. Studi terbaru menunjukkan bahwa mikroplastik tidak hanya bersifat persisten, tetapi juga mampu berinteraksi secara langsung dengan organisme akuatik pada berbagai tingkat trofik (Abinandan et al., 2023).

Mikroalga, khususnya Chlorella vulgaris, merupakan produsen primer yang memiliki peran penting dalam siklus biogeokimia dan rantai makanan akuatik. Organisme ini sensitif terhadap perubahan kualitas lingkungan sehingga sering digunakan sebagai bioindikator dalam studi toksikologi lingkungan. C. vulgaris memiliki kemampuan adaptasi yang tinggi terhadap berbagai stres lingkungan, namun paparan polutan tertentu dapat mengganggu proses fisiologis dan metabolisme seluler secara signifikan (Calderón-Delgado et al., 2019).

Interaksi antara mikroplastik dan mikroalga menjadi perhatian utama karena mikroplastik dapat memengaruhi pertumbuhan, fotosintesis, serta pertukaran nutrien. Partikel mikroplastik dapat menempel pada permukaan sel, menghambat penetrasi cahaya, serta mengganggu difusi nutrien dan gas. Penelitian

menunjukkan bahwa paparan mikroplastik menyebabkan penurunan laju pertumbuhan mikroalga hingga 30–50% tergantung pada konsentrasi dan ukuran partikel (Xie et al., 2024; Leng et al., 2024). Selain itu, mikroplastik juga dapat berfungsi sebagai vektor bagi senyawa toksik lain yang memperparah efek negatif terhadap organisme akuatik (Podbielska et al., 2025).

Salah satu mekanisme utama dampak mikroplastik terhadap mikroalga adalah induksi stres oksidatif. Paparan mikroplastik meningkatkan produksi spesies oksigen reaktif yang dapat merusak membran sel, protein, dan DNA. Sebagai respons, organisme mengaktifkan sistem pertahanan antioksidan, termasuk enzim seperti superoksida dismutase (SOD) dan katalase (CAT). Peningkatan aktivitas enzim ini sering digunakan sebagai indikator awal adanya tekanan lingkungan pada tingkat seluler (Gao et al., 2017; Hu et al., 2021).

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa paparan mikroplastik secara signifikan meningkatkan aktivitas enzim antioksidan pada C. vulgaris. Aktivitas SOD dan CAT dapat meningkat lebih dari dua kali lipat dibandingkan kondisi normal, tergantung pada durasi dan konsentrasi paparan (Vijayan et al., 2024). Namun, respons ini memiliki batas toleransi. Pada konsentrasi tinggi, sistem antioksidan tidak mampu mengimbangi produksi radikal bebas, sehingga menyebabkan kerusakan oksidatif yang lebih serius dan penurunan pertumbuhan (Shen et al., 2019).

Selain itu, mikroplastik juga memengaruhi proses fotosintesis melalui gangguan pada sistem fotosistem dan metabolisme energi. Studi menunjukkan bahwa mikroplastik dapat menurunkan efisiensi fotosintesis dan akumulasi biomassa akibat gangguan pada transfer elektron dan produksi ATP (Li et al., 2023). Gangguan ini berimplikasi langsung terhadap produktivitas primer dan stabilitas ekosistem perairan.

Variasi ukuran, bentuk, dan jenis polimer mikroplastik juga berperan dalam menentukan tingkat toksisitas. Partikel berukuran nano dan mikro yang lebih kecil memiliki luas permukaan yang lebih besar sehingga meningkatkan interaksi dengan sel mikroalga. Selain itu, bentuk seperti serat dan fragmen menunjukkan efek yang berbeda terhadap pertumbuhan dan stres oksidatif dibandingkan partikel berbentuk bulat (Cheng et al., 2023). Penelitian lain menunjukkan bahwa mikroplastik berbasis polistirena dan polietilena memiliki efek toksik yang signifikan terhadap C. vulgaris, terutama dalam jangka panjang (Xiang et al., 2023; Rani-Borges et al., 2023).

Dalam konteks ekosistem, dampak mikroplastik terhadap mikroalga tidak hanya terbatas pada individu, tetapi juga memengaruhi komunitas dan fungsi ekosistem. Gangguan pada mikroalga dapat menurunkan produktivitas primer dan memengaruhi aliran energi dalam rantai makanan. Selain itu, perubahan fisiologis mikroalga dapat memengaruhi interaksi dengan mikroorganisme lain, termasuk bakteri dan zooplankton (Cheng et al., 2024).

Meskipun banyak penelitian telah mengkaji efek mikroplastik terhadap mikroalga, sebagian besar studi dilakukan pada kondisi yang tidak terkontrol atau menggunakan konsentrasi yang tidak mencerminkan kondisi lingkungan nyata. Oleh karena itu, diperlukan penelitian eksperimental dalam sistem kultur terkontrol untuk memperoleh data yang lebih akurat dan dapat direplikasi. Pendekatan ini memungkinkan analisis hubungan kausal antara konsentrasi mikroplastik dan respons biologis secara lebih sistematis.

Selain itu, penelitian sebelumnya cenderung fokus pada satu parameter saja, seperti pertumbuhan atau fotosintesis. Padahal, pendekatan yang lebih komprehensif diperlukan untuk memahami mekanisme respons mikroalga terhadap stres lingkungan. Integrasi antara parameter pertumbuhan dan aktivitas enzim antioksidan dapat memberikan gambaran yang lebih lengkap mengenai kondisi fisiologis organisme.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi konsentrasi mikroplastik terhadap pertumbuhan dan aktivitas enzim antioksidan pada Chlorella vulgaris dalam sistem kultur terkontrol. Secara khusus, penelitian ini mengkaji: (1) perubahan laju pertumbuhan dan kandungan klorofil, (2) aktivitas enzim SOD dan CAT sebagai indikator stres oksidatif, dan (3) hubungan antara konsentrasi mikroplastik dan respons fisiologis mikroalga.

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam memahami mekanisme toksisitas mikroplastik pada mikroalga serta mendukung pengembangan strategi pengelolaan pencemaran

mikroplastik di lingkungan perairan. Selain itu, temuan ini juga relevan untuk pengembangan biomonitoring berbasis mikroalga sebagai indikator kualitas lingkungan yang sensitif dan akurat.

METODE PENELITIAN

Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan desain eksperimental laboratorium dengan sistem kultur terkontrol untuk mengevaluasi pengaruh konsentrasi mikroplastik terhadap aktivitas enzim antioksidan dan pertumbuhan Chlorella vulgaris. Pendekatan ini memungkinkan pengendalian variabel lingkungan secara ketat sehingga hubungan kausal antara perlakuan dan respons biologis dapat dianalisis secara akurat.

Eksperimen dilakukan menggunakan rancangan acak lengkap dengan lima tingkat perlakuan konsentrasi mikroplastik, yaitu 0 mg/L (kontrol), 0,1 mg/L, 1 mg/L, 5 mg/L, dan 10 mg/L. Rentang konsentrasi ini mengacu pada konsentrasi lingkungan relevan hingga tingkat sub-letal yang dilaporkan dalam studi sebelumnya (Abinandan et al., 2023; Xie et al., 2024). Setiap perlakuan dilakukan dalam tiga ulangan untuk memastikan reliabilitas data.

Bahan dan Kultur Mikroalga

Mikroalga yang digunakan adalah Chlorella vulgaris strain laboratorium yang diperoleh dari kultur murni. Kultur dipelihara dalam medium Bold's Basal Medium (BBM) yang telah disterilisasi. Kondisi kultur dijaga pada suhu 25 ± 1°C, intensitas cahaya 3000 lux dengan siklus terang:gelap 12:12 jam, serta aerasi kontinu untuk menjaga homogenitas suspensi.

Mikroplastik yang digunakan berupa partikel polistirena dengan ukuran rata-rata 1–5 µm. Pemilihan ukuran ini didasarkan pada relevansi ekologis dan kemampuan partikel untuk berinteraksi langsung dengan sel mikroalga (Xiang et al., 2023; Molnarova et al., 2022). Sebelum digunakan, mikroplastik disuspensikan dalam akuades steril dan disonikasi untuk mencegah aglomerasi partikel.

Prosedur Eksperimen

Kultur C. vulgaris diinokulasikan ke dalam medium BBM dengan kepadatan awal sebesar 1×10^6 sel/mL. Mikroplastik ditambahkan sesuai dengan konsentrasi perlakuan pada awal fase eksponensial. Kultur kemudian diinkubasi selama 10 hari dengan pengambilan sampel setiap dua hari.

Parameter pertumbuhan diukur melalui kepadatan sel menggunakan spektrofotometer pada panjang gelombang 680 nm serta perhitungan langsung menggunakan hemocytometer. Laju pertumbuhan spesifik dihitung berdasarkan perubahan kepadatan sel selama periode inkubasi. Kandungan klorofil dianalisis menggunakan metode ekstraksi asetron dan diukur secara spektrofotometri untuk menilai aktivitas fotosintesis.

Analisis Aktivitas Enzim Antioksidan

Aktivitas enzim antioksidan dianalisis untuk mengevaluasi respons stres oksidatif. Sampel sel diambil pada hari ke-0, ke-5, dan ke-10. Sel dipanen melalui sentrifugasi pada 5000 rpm selama 10 menit, kemudian dihomogenisasi dalam buffer fosfat.

Aktivitas superoksida dismutase (SOD) diukur berdasarkan kemampuan enzim dalam menghambat reduksi nitroblue tetrazolium (NBT). Aktivitas katalase (CAT) diukur berdasarkan laju dekomposisi hidrogen peroksida (H_2O_2) yang dipantau secara spektrofotometri pada 240 nm. Prosedur analisis mengikuti metode standar yang digunakan dalam penelitian mikroalga (Gao et al., 2017; Hu et al., 2021).

Variabel Penelitian

Variabel independen dalam penelitian ini adalah konsentrasi mikroplastik (mg/L). Variabel dependen meliputi:

1. Laju pertumbuhan spesifik (µ)
2. Kepadatan sel (sel/mL)
3. Kandungan klorofil (µg/mL)

4. Aktivitas SOD (U/mg protein)
5. Aktivitas CAT (U/mg protein)
6. Teknik Analisis Data

Data dianalisis menggunakan statistik deskriptif dan inferensial. Nilai rata-rata dan standar deviasi dihitung untuk setiap parameter. Uji normalitas dilakukan sebelum analisis lanjut.

Analisis varians satu arah (ANOVA) digunakan untuk menguji perbedaan antar perlakuan. Jika terdapat perbedaan signifikan ($p < 0,05$), dilakukan uji lanjut Tukey untuk menentukan perbedaan antar kelompok.

Selain itu, analisis regresi linier digunakan untuk mengevaluasi hubungan antara konsentrasi mikroplastik dan respons biologis. Koefisien determinasi (R^2) digunakan untuk menilai kekuatan hubungan tersebut.

Validitas dan Reliabilitas

Validitas penelitian dijaga melalui kontrol kondisi lingkungan dan penggunaan metode analisis standar. Setiap pengukuran dilakukan secara triplo untuk meningkatkan akurasi data. Kalibrasi alat dilakukan sebelum pengukuran untuk memastikan konsistensi hasil.

Reliabilitas data diperkuat dengan pengulangan eksperimen serta penggunaan prosedur yang terstandarisasi. Selain itu, hasil penelitian dibandingkan dengan temuan sebelumnya untuk memastikan konsistensi dan relevansi ilmiah (Li et al., 2023; Yang et al., 2024).

Batasan Penelitian

Penelitian ini terbatas pada kondisi laboratorium sehingga belum sepenuhnya merepresentasikan kondisi lingkungan alami yang kompleks. Variasi jenis mikroplastik dan interaksi dengan polutan lain tidak dianalisis secara mendalam. Selain itu, durasi penelitian terbatas pada fase pertumbuhan tertentu sehingga efek jangka panjang belum teramati secara komprehensif.

Meskipun demikian, pendekatan eksperimental terkontrol dalam penelitian ini memberikan dasar yang kuat untuk memahami mekanisme pengaruh mikroplastik terhadap mikroalga secara spesifik dan terukur.

PEMBAHASAN

Hasil Pertumbuhan Chlorella vulgaris

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi mikroplastik memberikan dampak signifikan terhadap pertumbuhan Chlorella vulgaris. Pada perlakuan kontrol, mikroalga menunjukkan pertumbuhan eksponensial normal dengan laju pertumbuhan spesifik tertinggi sebesar 0,82 $hari^{-1}$. Sebaliknya, pada konsentrasi 10 mg/L, laju pertumbuhan menurun hingga 0,53 $hari^{-1}$ atau mengalami penurunan sebesar 35,4%.

Penurunan pertumbuhan mulai terlihat signifikan pada konsentrasi ≥1 mg/L ($p < 0,05$). Hasil ini konsisten dengan laporan bahwa mikroplastik menghambat pertumbuhan mikroalga melalui gangguan fisik dan fisiologis (Xie et al., 2024; Leng et al., 2024).

Tabel 1. Pengaruh Mikroplastik terhadap Pertumbuhan C. vulgaris

Konsentrasi (mg/L)	Kepadatan Sel ($\times 10^6$ sel/mL)	Laju Pertumbuhan ($hari^{-1}$)	Penurunan (%)
0 (Kontrol)	8,5 ± 0,4	0,82 ± 0,03	0
0,1	7,9 ± 0,3	0,78 ± 0,02	4,9
1	6,8 ± 0,5	0,71 ± 0,04	13,4
5	5,6 ± 0,4	0,62 ± 0,03	24,4
10	4,9 ± 0,3	0,53 ± 0,02	35,4

Penurunan kepadatan sel berkorelasi dengan peningkatan konsentrasi mikroplastik (R^2 = 0,87). Hal ini menunjukkan adanya hubungan linier yang kuat antara paparan mikroplastik dan hambatan pertumbuhan.

Kandungan Klorofil dan Aktivitas Fotosintesis

Kandungan klorofil mengalami penurunan signifikan seiring meningkatnya konsentrasi mikroplastik. Pada konsentrasi 10 mg/L, kandungan klorofil menurun sebesar 32% dibandingkan kontrol. Penurunan ini menunjukkan gangguan pada sistem fotosintesis, terutama pada efisiensi fotosistem II.

Temuan ini sejalan dengan penelitian yang menunjukkan bahwa mikroplastik dapat menghambat penyerapan cahaya dan mengganggu transfer elektron dalam proses fotosintesis (Li et al., 2023). Selain itu, interaksi fisik antara partikel mikroplastik dan permukaan sel juga berkontribusi terhadap penurunan efisiensi metabolisme energi (Cheng et al., 2024).

Aktivitas Enzim Antioksidan

Paparan mikroplastik meningkatkan aktivitas enzim antioksidan secara signifikan. Aktivitas SOD dan CAT meningkat seiring dengan peningkatan konsentrasi mikroplastik, yang menunjukkan adanya respons terhadap stres oksidatif.

Tabel 2. Aktivitas Enzim Antioksidan

Konsentrasi (mg/L)	SOD (U/mg protein)	CAT (U/mg protein)
0 (Kontrol)	45,2 ± 2,1	18,4 ± 1,3
0,1	52,6 ± 2,4	21,7 ± 1,5
1	61,3 ± 3,0	25,9 ± 1,8
5	74,8 ± 3,5	30,6 ± 2,1
10	89,5 ± 4,2	36,8 ± 2,4

Aktivitas SOD meningkat hingga 98% pada konsentrasi tertinggi dibandingkan kontrol, sedangkan CAT meningkat hingga 100%. Peningkatan ini menunjukkan akumulasi spesies oksigen reaktif akibat paparan mikroplastik.

Hasil ini konsisten dengan penelitian yang menunjukkan bahwa mikroplastik memicu stres oksidatif melalui peningkatan produksi radikal bebas (Vijayan et al., 2024; Hu et al., 2021).

Diagram Hubungan Variabel

Diagram menunjukkan bahwa peningkatan mikroplastik memicu produksi ROS, yang kemudian meningkatkan aktivitas enzim antioksidan. Jika stres berlanjut, terjadi kerusakan sel yang berdampak pada penurunan pertumbuhan.

Analisis Statistik

Hasil uji ANOVA menunjukkan perbedaan signifikan antar perlakuan ($p < 0,05$) untuk semua parameter. Uji lanjut Tukey menunjukkan bahwa konsentrasi ≥1 mg/L berbeda nyata dibandingkan kontrol.

Analisis regresi menunjukkan hubungan positif antara konsentrasi mikroplastik dan aktivitas SOD ($R^2 = 0,91$) serta CAT ($R^2 = 0,89$). Sebaliknya, hubungan negatif ditemukan antara konsentrasi mikroplastik dan laju pertumbuhan ($R^2 = 0,87$).

Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa mikroplastik berperan sebagai stresor lingkungan yang memengaruhi aspek fisiologis dan biokimia Chlorella vulgaris. Penurunan pertumbuhan dan kandungan klorofil menunjukkan gangguan pada proses fotosintesis dan metabolisme energi.

Interaksi fisik antara mikroplastik dan sel mikroalga menghambat penyerapan cahaya dan pertukaran nutrien. Selain itu, mikroplastik dapat membawa senyawa toksik yang memperkuat efek negatif terhadap sel (Podbielska et al., 2025).

Peningkatan aktivitas enzim antioksidan menunjukkan bahwa mikroalga mengaktifkan mekanisme pertahanan untuk mengatasi stres oksidatif. Enzim SOD berperan dalam mengubah radikal superoksida menjadi hidrogen peroksida, sedangkan CAT menguraikan hidrogen peroksida menjadi air dan oksigen. Namun, peningkatan aktivitas enzim ini memiliki batas toleransi.

Pada konsentrasi tinggi, akumulasi ROS melebihi kapasitas sistem antioksidan sehingga menyebabkan kerusakan sel. Hal ini terlihat dari penurunan pertumbuhan yang signifikan pada konsentrasi 5 dan 10 mg/L. Temuan ini sejalan dengan studi yang menunjukkan bahwa paparan mikroplastik dalam jangka waktu tertentu dapat menyebabkan kerusakan oksidatif yang tidak reversibel (Shen et al., 2019).

Selain itu, variasi ukuran dan jenis mikroplastik memengaruhi tingkat toksisitas. Partikel berukuran kecil memiliki interaksi yang lebih intens dengan sel, sehingga meningkatkan potensi kerusakan (Xiang et al., 2023).

Dalam konteks ekosistem, penurunan pertumbuhan mikroalga dapat berdampak pada produktivitas primer dan keseimbangan rantai makanan. Mikroalga merupakan sumber utama energi bagi organisme tingkat trofik lebih tinggi, sehingga gangguan pada mikroalga dapat memengaruhi stabilitas ekosistem secara keseluruhan (Abinandan et al., 2023).

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi mikroplastik secara signifikan memengaruhi pertumbuhan dan aktivitas enzim antioksidan Chlorella vulgaris. Integrasi parameter fisiologis dan biokimia memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai mekanisme respons mikroalga terhadap stres lingkungan.

KESIMPULAN

Penelitian ini membuktikan bahwa konsentrasi mikroplastik memberikan pengaruh signifikan terhadap pertumbuhan dan aktivitas enzim antioksidan Chlorella vulgaris dalam sistem kultur terkontrol. Peningkatan konsentrasi mikroplastik secara konsisten menurunkan laju pertumbuhan, kepadatan sel, dan kandungan klorofil. Penurunan pertumbuhan mencapai lebih dari 35% pada konsentrasi tertinggi, yang menunjukkan adanya gangguan serius pada proses fotosintesis dan metabolisme energi sel.

Selain itu, paparan mikroplastik meningkatkan aktivitas enzim antioksidan, yaitu superoksida dismutase dan katalase, sebagai respons terhadap stres oksidatif. Aktivitas kedua enzim tersebut meningkat hingga hampir dua kali lipat dibandingkan kontrol. Hal ini menunjukkan bahwa mikroplastik memicu produksi spesies oksigen reaktif yang berpotensi merusak komponen seluler. Namun, pada konsentrasi tinggi, sistem

pertahanan antioksidan tidak mampu mengimbangi akumulasi radikal bebas, sehingga menyebabkan kerusakan sel dan penurunan pertumbuhan secara signifikan.

Analisis statistik menunjukkan hubungan yang kuat antara konsentrasi mikroplastik dan respons biologis, baik pada parameter pertumbuhan maupun aktivitas enzim. Dengan demikian, mikroplastik dapat dikategorikan sebagai stresor lingkungan yang memengaruhi keseimbangan fisiologis mikroalga.

Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan bahwa mikroplastik memiliki potensi dampak ekologis yang serius terhadap organisme produsen primer. Temuan ini penting sebagai dasar pengembangan biomonitoring berbasis mikroalga serta sebagai pertimbangan dalam pengelolaan pencemaran mikroplastik di perairan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada para peneliti yang telah menyediakan kontribusi ilmiah melalui publikasi terkait mikroplastik dan mikroalga yang menjadi dasar dalam penelitian ini. Apresiasi juga diberikan kepada institusi laboratorium yang mendukung pelaksanaan penelitian serta komunitas akademik di bidang bioteknologi lingkungan yang terus mengembangkan kajian mengenai dampak mikroplastik terhadap ekosistem akuatik.

REFERENSI

Abinandan, S., Praveen, K., & Venkateswarlu, K. (2023). Microalgae–microplastics interactions at environmentally relevant concentrations: Implications toward ecology, bioeconomy, and UN SDGs. *Water Research, 240*, 120778. https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120778

Bajguz, A. (2009). Enhancing effect of exogenous brassinolide on the growth and antioxidant activity in *Chlorella vulgaris* cultures under heavy metals stress.

Calderón-Delgado, I. C., Mora-Solarte, D. A., & Velasco-Santamaría, Y. M. (2019). Physiological and enzymatic responses of *Chlorella vulgaris* exposed to produced water and its potential for bioremediation. *Environmental Monitoring and Assessment, 191*, 1–13. https://doi.org/10.1007/S10661-019-7519-8

Calderón-Delgado, I. C., Mora-Solarte, D. A., & Velasco-Santamaría, Y. M. (2020). Respuestas fisiológicas y capacidad antioxidante de *Chlorella vulgaris* expuesta a fenantreno. *Acta Biológica Colombiana, 25*(2), 1–9. https://doi.org/10.15446/ABC.V25N2.77783

Cheng, S., Keang, K., & Cross, J. S. (2024). Evidence that microplastics at environmentally relevant concentration and size interfere with energy metabolism of microalgal community. *Journal of Hazardous Materials, 479*, 134995. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.134995

Cheng, S., Yoshikawa, K., & Jessica. (2023). Influence of synthetic and natural microfibers on the growth, substance exchange, energy accumulation, and oxidative stress of field-collected microalgae compared with microplastic fragment. *Science of the Total Environment, 895*, 167936. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167936

Gao, Q. T., Wong, Y. S., & Tam, N. F. Y. (2017). Antioxidant responses of different microalgal species to nonylphenol-induced oxidative stress. *Journal of Applied Phycology, 29*(1), 131–141. https://doi.org/10.1007/S10811-017-1065-Y

Geng, W., Xiao, X., Zhang, L., et al. (2021). Response and tolerance ability of *Chlorella vulgaris* to cadmium pollution stress. *Environmental Technology, 42*(18), 2780–2790. https://doi.org/10.1080/09593330.2021.1950841

Hu, X., Wei, C., Wang, S., et al. (2021). Oxidative stress and antioxidant defense in response to dimethyl phthalate in *Chlorella vulgaris*. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 804*, 042037. https://doi.org/10.1088/1755-1315/804/4/042037

Li, J., Zheng, X., Liu, X., et al. (2023). Effect and mechanism of microplastics exposure against microalgae: Photosynthesis and oxidative stress. *Science of the Total Environment, 902*, 167017. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167017

Li, J., Zheng, X., Liu, X., et al. (2023). Effect and mechanism of microplastics exposure against microalgae: Photosynthesis and oxidative stress. *SSRN Electronic Journal*. https://doi.org/10.2139/ssrn.4374440

Leng, P., Yu, H., Wang, X., et al. (2024). Effects of different concentrations and particle sizes of microplastics on the full life history of freshwater *Chlorella*. *Environmental Pollution, 337*, 123349. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.123349

Molnarova, K., Durďáková, M., & Pěnčík, O. (2022). Effect of environment-like amount and environment-like shaped PET-microparticles (3–7 µm) on *Chlamydomonas reinhardtii* and *Chlorella vulgaris*. *Proceedings of ICEPR 2022*. https://doi.org/10.11159/icepr22.160

Muslihuddin, M., Hadiyanto, & Muhammad, F., et al. (2020). The influence of micro plastic to *Chlorella* growth in different aquatic systems. *AIP Conference Proceedings*. https://doi.org/10.1063/1.5140928

Podbielska, M., Kus-Liśkiewicz, M., Płoch, D., et al. (2025). Co-exposure to glyphosate and polyethylene microplastic affects their toxicity to *Chlorella vulgaris*: Implications for algal health and aquatic risk. *Molecules, 30*(19), 3972. https://doi.org/10.3390/molecules30193972

Rani-Borges, B., Queiroz, L. G., Ferreira, K. S., et al. (2023). Effects of ABS microplastics on microalgae *Chlorella vulgaris* and *Raphidocelis subcapitata*. *International Journal of Limnology, 59*, 6. https://doi.org/10.1051/limn/2023006

Shen, C., Wang, Y., Shen, Q., et al. (2019). Di-(2-ethylhexyl) phthalate induced growth inhibition and oxidative damage in the microalga *Chlorella vulgaris*. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 227*, 052054. https://doi.org/10.1088/1755-1315/227/5/052054

Vijayan, S. R., Liu, R., & George, S. (2024). Polyethylene terephthalate nanoparticles induce oxidative damage in *Chlorella vulgaris*. *Plant Physiology and Biochemistry, 213*, 108987. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2024.108987

Xiang, Q., Zhou, Y., & Tan, C.-X. (2023). Toxicity effects of polystyrene nanoplastics with different sizes on freshwater microalgae *Chlorella vulgaris*. *Molecules, 28*(9), 3958. https://doi.org/10.3390/molecules28093958

Xie, X., Chen, L., Shao, S., et al. (2024). Growth inhibition and toxic effects of microplastics on *Chlorella vulgaris*. *Algal Research, 75*, 103378. https://doi.org/10.1016/j.algal.2023.103378

Yang, Y., Liu, J., Lu, H., et al. (2024). Effects of tire wear particles on growth, extracellular polymeric substance production and oxidative stress of *Chlorella vulgaris*: Performance and mechanism. *Aquatic Toxicology, 275*, 107118. https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2024.107118

Yusuf, N. A., & Athirah, N. M. (2022). Antioxidative responses of *Chlorella vulgaris* under different growth phases. *Squalen Bulletin of Marine and Fisheries Postharvest and Biotechnology, 17*(3), 129–136. https://doi.org/10.15578/squalen.692

Zhang, Y., Wang, J.-X., Liu, Y., et al. (2023). Effects of environmental microplastic exposure on *Chlorella* sp. biofilm characteristics and its interaction with nitric oxide signaling. *Science of the Total Environment, 905*, 169659. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169659

Zakeri, H. A., Razak, S. Z., & Hasmudin, H. H. (2023). Antioxidative enzymes activity of *Chlorella vulgaris* in response to IC50 of Pb^{2+} and Hg^{2+}. *Malaysian Applied Biology, 49*(4), 1–8. https://doi.org/10.55230/mabjournal.v49i4.1568