

MEKANISME TOKSISITAS DAN DETOKSIFIKASI MIKROPLASTIK PADA MIKROALGA: LITERATURE REVIEW

Mechanism of Microplastic Toxicity and Detoxification in Microalgae: Literature Review

Rega Permana^{1*)}, Aulia Andhikawati¹⁾

¹⁾Program Studi Perikanan Laut Tropis, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas
Padjadjaran, Jatinangor, Indonesia

*Korespondensi : rega.permana@unpad.ac.id
Diterima; Disetujui

ABSTRACT

Microplastic particles are likely to interact with primary producers in aquatic ecosystems, microalgae, thereby disrupting ecological balance and posing risks to human health through biomagnification and bioaccumulation. This paper aims to comprehensively review the physiological impacts of microplastic exposure on microalgae and the associated detoxification mechanisms from published literature. The literature review was conducted by searching scientific articles indexed in both national and international databases. The included articles were publications from the last ten years (2014–2024) that reported experimental data on microplastic exposure in freshwater and marine microalgae. A review of previous studies published in national and international journals shows that, physiologically, microplastic exposure inhibits cell growth, disrupts photosynthesis, increases the concentration of reactive oxygen species (ROS) along with the activity of related antioxidant enzymes, and induces cell membrane peroxidation. Microalgal cells can employ several mechanisms to maintain cellular integrity, including the secretion of extracellular polysaccharides (EPS), vacuole formation, homo-aggregation and hetero-aggregation, as well as biochemical detoxification. Information on these impacts is crucial for supporting mitigation and prevention efforts related to microplastic pollution in aquatic environments.

Keywords: *detoxification, ecotoxicology, physiology, microalgae, microplastic*

ABSTRAK

Partikel mikroplastik memiliki kemungkinan yang besar untuk berinteraksi dengan komunitas mikroalga, kelompok produsen primer utama di perairan, dan kemudian mengganggu keseimbangan ekologi serta memberikan resiko pada kesehatan manusia melalui mekanisme biomagnifikasi dan bioakumulasi. Tulisan ini bertujuan untuk mengkaji dampak fisiologi dari paparan mikroplastik pada mikroalga secara komprehensif serta mekanisme detoksifikasinya melalui studi yang telah dipublikasi. Studi literatur dilakukan dengan menelusuri artikel ilmiah pada basis data terindeks baik nasional maupun internasional. Artikel yang disertakan merupakan publikasi yang terbit maksimal 10 tahun terakhir (2014–2024) dan melaporkan data eksperimental mengenai paparan mikroplastik pada mikroalga air tawar maupun laut. Hasil studi literature dari penelitian – penelitian terdahulu yang terpublikasi di jurnal nasional dan internasional menunjukkan bahwa secara fisiologi terlihat dari terhambatnya pertumbuhan sel, terganggunya proses fotosintesis, meningkatnya konsentrasi *reactive oxygen species* (ROS) beserta aktivitas anzim antioksidan yang terlibat dan peroksidasi membrane sel. Sel mikroalga dapat melakukan beberapa mekanisme dalam mempertahankan sel yaitu dengan sekresi polisakarida eksternal (EPS), pembentukan vakuola, homo-agregasi dan hetero-

agregasi, serta detoksifikasi secara biokimia. Informasi mengenai dampak – dampak tersebut dibutuhkan sebagai upaya penanganan dan antisipasi pencemaran mikroplastik di perairan.

Kata kunci : detoksifikasi, ekotoksikologi, fisiologi, mikroalga, mikroplastik

PENDAHULUAN

Pencemaran plastik telah menjadi permasalahan utama di berbagai badan lingkungan, terutama di lingkungan perairan (Zhang *et al*, 2020; Rizal *et al*, 2021; Hidayati *et al*, 2022). Sejak pertama kali digunakan secara massal di sekitar tahun 1950, plastik telah menjadi bagian dari kehidupan manusia bahkan produksinya mencapai 400.15 juta ton di tahun 2022 (Europe, 2023). Negara di Asia khususnya Asia Tenggara merupakan penyumbang sampah plastik di dunia, termasuk China, Filipina, Thailand dan Indonesia (Jambeck *et al*, 2015; Permana *et al*, 2020). Diperkirakan sebanyak 6.8 juta ton sampah plastik terproduksi per tahun dengan penambahan sebesar 5% per tahun (Global Plastic Action, 2022). Sebagian besar dari jumlah tersebut tidak terkelola dengan baik sehingga memasuki lingkungan perairan dan berakhir di laut (Permana *et al*, 2022). Jumlah sampah plastik di Indonesia yang diprediksikan memasuki lingkungan laut mencapai kurang lebih 30% atau 800.000 ton pada tahun 2025. Permasalahan sampah di wilayah Indonesia juga berpotensi dapat memicu pencemaran lintas negara (transboundary pollution) karena kemungkinan penyebaran sampah plastik yang terbawa arus hingga memasuki wilayah negara tetangga (Handyman *et al*, 2019).

Plastik yang memasuki perairan dapat mengalami transformasi secara fisik karena pengaruh lingkungan seperti suhu

dan arus, sehingga membentuk partikel yang lebih kecil berukuran maksimal 5 mm, atau disebut mikroplastik (Ayuningtyas *et al*, 2019). Mikroplastik telah ditemukan hampir diseluruh bagian lingkungan mulai air, sedimen, tanah, es hingga ke wilayah laut dalam (Hanif *et al*, 2021). Karena sifatnya yang resisten terhadap degradasi, Mikroplastik akan terakumulasi dan beresiko untuk terpapar pada manusia. Kandungan Mikroplastik pada organisme perairan seperti ikan, bivalvia hingga mamalia laut telah dideteksi pada beberapa studi, bahkan penelitian terbaru menemukan Mikroplastik pada sel darah manusia (Zantis *et al*, 2021; Leslie *et al*, 2022). Mikroplastik dengan konsentrasi hingga 3.8 ug/L ditemukan di empat muara sungai teluk Chesapeake di San Fransisco (Yonkos *et al*, 2014) dan jumlah lebih banyak ditemukan di Sungai Danube di Eropa yaitu mencapai 700 ug/L (Lechner *et al*, 2014). Teluk Benoa yang terletak di Bali dilaporkan telah terkontaminasi Mikroplastik dengan kepadatan 0.58 partikel/m³ yang didominasi oleh jenis fragmen (Nugroho *et al*, 2018). Sementara di Danau Taihu, di China, konsentrasi Mikroplastik bahkan mencapai 50 mg/L ppm (Su *et al*, 2016). Berdasarkan estimasi, setiap tahun sebanyak 12.7 juta ton Mikroplastik memasuki wilayah perairan laut (Jambeck *et al*, 2015). Hal ini menunjukkan bahwa resiko paparan Mikroplastik melalui biomagnifikasi di ekosistem perairan merupakan kajian penting untuk dapat memahami bahaya dan pencegahan paparannya ke manusia.

Proses bioakumulasi dan biomagnifikasi mikroplastik di lingkungan perairan akan dimulai melalui interaksi antara fragmen Mikroplastik dengan kelompok organisme produsen primer yang menempati strata paling bawah pada rantai makanan, yaitu mikroalga. Mikroalga merupakan organisme uniseluler yang bersifat autotroph dan memegang peranan penting dalam ekologi perairan, sebagai produsen primer sekaligus penyedia oksigen (Cokrowati *et al.*, 2014). Ukuran mikroalga yang mikroskopik, membuat mereka rentan terhadap paparan Mikroplastik. Produksi plastik yang terus meningkat dan volume sampah plastik yang masuk ke badan perairan secara terus menerus, dampak negative Mikroplastik dapat mempengaruhi populasi mikroalga dan menyebabkan dampak ekologi lainnya.

Mikroplastik dapat mempengaruhi mikroalga melalui beberapa cara diantaranya adalah mengganggu metabolisme sel mikroalga dan merusak sel mikroalga secara fisik sehingga tidak dapat berfungsi sebagaimana mestinya (Prata *et al.*, 2019). Hal ini dipengaruhi oleh jenis spesies mikroalga dan kemampuannya untuk mendetoksifikasi material asing yang masuk ke dalam selnya, ukuran partikel Mikroplastik serta jenis material penyusun Mikroplastik tersebut. Namun, beberapa studi menunjukkan bahwa keberadaan mikroplastik tidak hanya berdampak negatif, tetapi juga dapat berkorelasi positif dengan kelimpahan mikroalga, khususnya pada biofilm permukaan. Barnes *et al.* (2024) melaporkan korelasi positif yang signifikan antara kelimpahan alga hijau dan jumlah mikroplastik yang terakumulasi dalam biofilm air tawar, sedangkan eksperimen mesokos lain menunjukkan bahwa penambahan mikroplastik dapat meningkatkan

biomassa fitoplankton pada komunitas laut (Montoya *et al.*, 2024).

Tulisan ini bertujuan untuk mengkaji dan mengulas studi penelitian – penelitian terkait dampak paparan Mikroplastik pada mikroalga secara fisiologi untuk mendapatkan gambaran komprehensif mengenai kerentanan kelompok produsen primer di perairan ini terhadap pencemaran Mikroplastik. Kajian ini akan melingkupi pembahasan terkait dampaknya pada individu diikuti dengan mekanisme detoksifikasinya.

METODOLOGI

Penelusuran literatur dilakukan dengan pendekatan naratif namun sistematis untuk memastikan cakupan kajian yang relevan dan terkini. Kami mulai dengan identifikasi artikel melalui tiga basis data utama: Scopus, Web of Science, dan Google Scholar. Kombinasi kata kunci yang digunakan mencakup “*microplastic*”, “*microalgae*”, “*toxicity*”, “*photosynthesis*”, “*oxidative stress*”, dan “*detoxification*”. Artikel yang disertakan adalah publikasi nasional maupun internasional yang terbit antara tahun 2014–2024, dan melaporkan data eksperimental terkait paparan mikroplastik terhadap mikroalga (Guo *et al.*, 2024).

Proses seleksi mencakup tiga tahapan:

1. Penyaringan judul dan abstrak untuk menilai relevansi terhadap interaksi mikroplastik–mikroalga (Parsai *et al.*, 2022).
2. Pemeriksaan isi lengkap artikel untuk memastikan bahwa penelitian tersebut melaporkan parameter fisiologis mikroalga (pertumbuhan, fotosintesis, ROS, atau mekanisme detoksifikasi) dan bukan hanya data

keberadaan mikroplastik di lingkungan.

3. Ekstraksi data dari artikel-terpilih, mencakup jenis mikroplastik, ukuran, konsentrasi paparan, spesies mikroalga, dan hasil pengukuran. Dari proses seleksi ini, artikel yang dinyatakan paling relevan akan digunakan dalam kajian ini sebagai basis pembahasan.

TINJAUAN UMUM MIKROPLASTIK

Plastik merupakan polimer sintetik yang tersusun atas monomer yang umumnya berbasis hidrokarbon dan diproses pada suhu tinggi, melalui reaksi polimerisasi (Septiari *et al*, 2014). Plastik di alam memiliki sifat resisten terhadap degradasi baik secara fisika, kimia maupun biologi sehingga membuatnya persisten dan dapat bertahan di lingkungan dalam jangka waktu yang panjang. Saat plastik memasuki wilayah perairan, proses fisik dan kimia perairan tidak akan menghilangkan plastik, namun dengan berjalannya waktu dan juga berdasarkan sifat material penyusunnya, plastik akan terurai menjadi partikel atau fragmen yang lebih kecil atau dikenal dengan Mikroplastik (Ayuningtyas *et al*, 2019).

Mikroplastik umumnya didefinisikan sebagai partikel plastik dengan ukuran berkisar antara 1 μm hingga 5 mm. Partikel ini berasal dari berbagai sumber dan dapat ditemukan di lingkungan perairan, tanah, bahkan udara. Berdasarkan proses terbentuknya, Mikroplastik dibagi menjadi dua kelompok utama, yakni Mikroplastik primer dan sekunder. Mikroplastik primer adalah partikel plastik berukuran kecil (kurang dari 5 mm) yang memang diproduksi secara sengaja untuk berbagai kebutuhan industri dan komersial. Jenis ini banyak

digunakan dalam produk pribadi dan kosmetik, seperti scrub wajah, pasta gigi, serta pembersih tubuh yang mengandung *microbeads* sebagai agen eksfoliasi. Selain itu, Mikroplastik primer juga dapat berasal dari serat tekstil sintesis, seperti poliester dan nilon, yang terlepas selama proses pencucian pakaian berbahan sintesis (Auta *et al.*, 2017). Partikel kecil ini sering kali masuk ke dalam sistem perairan melalui saluran pembuangan dan sulit terurai, sehingga berpotensi mencemari ekosistem akuatik.

Di sisi lain, Mikroplastik sekunder merupakan partikel yang terbentuk dari degradasi plastik berukuran makro akibat paparan faktor lingkungan, seperti radiasi ultraviolet, abrasi, dan proses biodegradasi yang terjadi dalam jangka waktu panjang. Plastik yang awalnya berukuran besar, seperti botol air mineral, kantong plastik, jaring ikan, dan kemasan makanan, dapat mengalami fragmentasi hingga menghasilkan partikel Mikroplastik. Proses ini dapat dipercepat di lingkungan laut akibat paparan sinar matahari, aksi gelombang, serta aktivitas organisme yang dapat mempercepat pelapukan plastik (Rahmat *et al.*, 2019). Karena bersifat persisten dan sulit terdegradasi, mikroplastik sekunder menjadi salah satu sumber utama pencemaran plastik di perairan dan berpotensi masuk ke dalam rantai makanan melalui organisme akuatik yang tanpa sengaja menelannya.

Mikroplastik dapat terbentuk di lingkungan perairan melalui proses foto-oksidasi, reaksi oksidasi secara termal dan degradasi secara mekanik atau biologis (Galloway *et al*, 2017). Plastik yang memasuki lingkungan perairan akan rentan terhadap foto-oksidasi yang dipicu oleh radiasi sinar ultraviolet (UV) dari matahari. Foto-oksidasi ini akan melepaskan fragmen polimer dengan

berat molekul rendah seperti monomer dan oligomer (Gewert *et al*, 2015). Proses degradasi secara mekanik maupun biologis akan memecah plastik menjadi partikel yang semakin kecil hingga berukuran nano (nanoplastik). Selain itu, fragmentasi plastik juga dapat berlangsung melalui proses termodoksidatif yang sangat dipengaruhi oleh suhu (Weinstein *et al*, 2016). Partikel Mikroplastik juga dapat mengalami agregasi, baik dengan partikel Mikroplastik lainnya (*homoaggregation*) maupun dengan material lain termasuk mikroalga (*heteroaggregation*) sehingga membuat aggregate Mikroplastik ini lebih berat dan mengendap di dalam sedimen (Long *et al*, 2017).

Mikroplastik dapat dibagi menjadi beberapa jenis berdasarkan tipe partikelnya. Menurut Brate *et al*, (2016), Tipe Mikroplastik diantaranya adalah Beads atau granula, Filamen, Fragmen dan Film. Riset terkait Mikroplastik awalnya berkembang dengan studi pada

dampak Mikroplastik tipe beads yang berbahan dasar Polyethylene karena mudah didapatkan dan tersedia secara luas, namun seiring dengan perkembangannya kajian mengenai tipe Mikroplastik lainnya semakin banyak diteliti (Rillig *et al*, 2019). Jenis mikroplastik yang paling sering dijumpai di lingkungan berdasarkan bahan penyusunnya antara lain *polystyrene* (PS), *polypropylene* (PP), *polyvinyl chloride* (PVC), *polyethylene* (PE), nilon, dan *polycarbonates*. Di antara jenis tersebut, PS, PP, dan PE merupakan mikroplastik yang paling dominan ditemukan di berbagai kompartemen lingkungan, termasuk perairan dan sedimen. (Cincinelli *et al*, 2017). Beberapa penelitian mengenai kuantifikasi jumlah dan sebaran Mikroplastik di perairan Indonesia telah banyak dilakukan. Bentuk yang umum ditemukan adalah fiber, fragmen dan film dengan konsentrasi partikel bervariasi sesuai dengan lokasi sampling (tabel 1).

Tabel 1. Konsentrasi dan Bentuk Mikroplastik pada Beberapa Perairan Indonesia

Lokasi Perairan	Konsentrasi Mikroplastik	Bentuk	Referensi
Teluk Benoa, Provinsi Bali	0.58 partikel/m ³	Film, Fragmen dan Fiber	Nugroho <i>et al</i> . 2018
Perairan Pesisir Berondong, Kabupaten Lamongan	444 partikel/mL	Film, Fragmen dan Fiber	Labibah & Triajie 2020
Perairan Karangjahe, Rembang, Jawa Tengah	500 partikel	Film, Fragmen dan Fiber	Nainggolan <i>et al</i> . 2022
Jembatan Talumolo, Provinsi Gorontalo	0.3 partikel/Liter	Film, Fragmen dan Fiber	Argiandini 2023
Kawasan Mangrove Perairan Banyuurip, Gresik, Jawa Timur	22.89 x 10 ² partikel/m ³		
Kawasan TPI Perairan Banyuurip, Gresik, Jawa Timur	10.44 x 10 ² partikel/m ³	Film, Fragmen dan Fiber	Ayuningtya <i>et al</i> . 2019
Kawasan Tambak Perairan Banyuurip, Gresik, Jawa Timur	8.89 x 10 ² partikel/m ³		

Kawasan muara Perairan Banyuurip, Gresik, Jawa Timur	7.78 x 10 ² partikel/m ³		
Kawasan laut terbuka Perairan Banyuurip, Gresik, Jawa Timur	7.71 x 10 ² partikel/m ³		
Sungai Porong, Kabupaten Sidoarjo, Jawa Timur	303 partikel/10 liter	Granule, Film, Fragmen dan Fiber	Seftianingrum <i>et al.</i> 2023
Perairan Desa Gugunung Wetan Kabupaten Rembang, Jawa Tengah	28 Partikel	Fiber	Rohmaniyah <i>et al.</i> 2024
Kolam Kebun Raya Purwodadi Pasuruan	35 partikel/50 liter	Film, Fragmen dan Fiber	Suhardi 2024
Permukaan Kolom Air Sungai Siak, Provinsi Riau	2827 partikel/m ³	Film, Fragmen dan Fiber	Tampubolon <i>et al.</i> 2024
Kedalaman 5 meter Kolom Air Sungai Siak, Provinsi Riau	3533 partikel/m ³	Film, Fragmen dan Fiber	
Kedalaman 10 meter Kolom Air Sungai Siak, Provinsi Riau	2720 partikel/m ³	Film, Fragmen dan Fiber	
Muara Sungai Wonorejo, Surabaya	324.7 partikel/100 liter	Film, Fragmen dan Fiber	Prayoga & Sartimbul 2024
Muara Sungai Tambak Wedi, Surabaya	478.3 partikel/100 liter	Film, Fragmen dan Fiber	

DAMPAK FISILOGI MIKROALGA AKIBAT PAPARAN MIKROPLASTIK

Gangguan pada system fotosintesis merupakan dampak fisiologi yang paling banyak dilaporkan sebagai akibat dari paparan mikroplastik pada mikroalga. Sebagai produsen primer di perairan, mikroalga sangat bergantung pada kemampuannya untuk melakukan fotosintesis untuk memproduksi biomassa sel mereka. Gangguan proses fotosintesis akan menyebabkan sel mengalami beragam dampak fisiologi. Penghambatan pertumbuhan, stress oksidatif dan gangguan pada sintesis kloroplas menjadi beberapa mekanisme umum yang ditemukan pada studi dampak toksik Mikroplastik pada mikroalga.

Beberapa studi telah melakukan kajian dampak yang terjadi akibat interaksi antara fragmen Mikroplastik dan sel mikroalga. Studi dilakukan pada berbagai jenis spesies baik spesies air tawar maupun air laut. Sebagai contoh, Luo *et al.*, (2019) mengamati pengaruh Mikroplastik terhadap pertumbuhan dan fotosintesis mikroalga air tawar jenis *Chlorella vulgaris*. *Tetraselmis chuii*, mikroalga yang sering dijadikan pakan alami dalam budidaya abalone juga dilaporkan mengalami dampak penghambatan pertumbuhan akibat paparan Mikroplastik. Sebuah studi yang dilakukan Seoane *et al.*, (2019) menunjukkan bahwa Mikroplastik jenis polystyrene (PS) yang telah temodifikasi gugus amin (-NH₂) dengan ukuran 50 nm, mampu menghambat pertumbuhan

diatom laut *Chaetoceros neogracile* hingga setengah dari populasi uji secara efektif setelah 72 jam paparan (EC50 72h) pada konsentrasi 2.5 ug/mL. Selain itu Pertumbuhan mikroalga *Dunaliella tertiolecta* diketahui terhambat sebesar 25.37% setelah terpapar mikropastik jenis PS yang bermuatan dengan ukuran 40 nm (Bergami *et al*, 2017). Mikroplastik jenis polyvinylchloride (PVC) dilaporkan memberikan dampak negative lebih banyak terhadap pertumbuhan dan fotosintesis mikroalga *Chlorella pyrenoidosa* dan *Microcystis flosaquae* dibandingkan dengan Mikroplastik polypropylene (PP) (Wu *et al*, 2019).

Pertumbuhan mikroalga berlangsung melalui empat fase utama, yaitu fase lag, fase eksponensial atau logaritmik, fase stasioner, dan fase kematian. Paparan Mikroplastik PS dengan ukuran 0.1 µm menunjukkan efek pada pertumbuhan *Chlorella pyrenoidosa* yaitu penghambatan sebesar 21%, 29% dan 38.5% masing – masing pada konsentrasi 10 mg/L, 50 mg/L dan 100 mg/L secara berurutan (Mao *et al*, 2018). Paparan tersebut juga ternyata menyebabkan fase logaritmik menjadi lebih panjang sehingga menghasilkan kepadatan sel yang lebih tinggi. Pertumbuhan sel mikroalga jenis *Phaeodactylum tricornutum* dan *Thalassiosira* sp. dilaporkan terhambat masing-masing hingga 78.56% dan 78.78% saat terpapar dengan mikropastik PVC selama 24 jam dengan konsentrasi 200 mg/L, sementara mikroalga jenis *Chaetoceros gracilis* menunjukkan penghambatan hingga 94.14 pada paparan Mikroplastik PVC dengan konsentrasi yang sama namun waktu paparan 96 jam (Wang *et al*, 2020). Zhang *et al*, (2017) melaporkan hasil studinya pada mikroalga jenis *Skeletonema costatum* yang dipaparkan Mikroplastik selama 96 jam dan

menghasil penghamabatan pertumbuhan hingga 39.7%. *Dunaliella tertiolecta* yang terpapar 10 mg/mL Mikroplastik PS berukuran 0.1 mm selama 72 jam mengalami penghambatan pertumbuhan hingga 40% (Gambardella *et al*, 2018). Terhambatnya pertumbuhan sel tersebut diduga disebabkan oleh pengalihan energy yang digunakan sel untuk mendetoksifikasi Mikroplastik seperti untuk sintesis polisakarida ekstraseluler (EPS) yang merupakan penyusun dinding sel.

Sintesis EPS yang berlebih juga dilaporkan pada beberapa studi dampak paparan Mikroplastik pada mikroalga. Sekresi EPS mikroalga jenis *Chlamydomonas reinhardtii* yang dipaparkan Mikroplastik berukuran 100 nm dengan konsentrasi 500 mg/L meningkat hingga 48% dan kandungan proteinnya juga meningkat hingga 1.85 kali lipat dibanding perlakuan kontrol (Yan *et al*, 2021). Lagarde *et al*, (2022) melaporkan bahwa dua gen pada mikroalga yang terlibat dalam biosintesis EPS yaitu UDP-glucuronate decarboxylase dan UDP glucose-4-epimerase mengalami over-ekspresi saat dipaparkan dengan Mikroplastik jenis HDPE berukuran 400 µm berkonsentrasi 1 g/L. Hal ini menunjukkan bahwa energi yang dimiliki sel untuk melakukan fotosintesis dan tumbuh telah dialihkan untuk melakukan biosintesis EPS pada saat terpapar Mikroplastik. Mikroplastik dapat berinteraksi dengan EPS dan menghalangi cahaya yang memasuki pusat reaksi fotosintesis serta mengganggu efisiensi transmisi electron (Zhang *et al*, 2017). Mikroplastik yang terikat pada membran sel ini juga dapat menghalangi keluar masuknya substansi penting dalam metabolisme sel termasuk gas dan energi.

Paparan Mikroplastik juga dilaporkan

mengurangi kandungan klorofil A, yang akan berakibat pada menurunnya aktivitas fotosintesis. Sebanyak 62.82% pengurangan kandungan Klorofil A terjadi pada *Phaeodactylum tricornutum* yang terpapar Mikroplastik PVC sebanyak 200 mg/L selama 96 jam. Hal yang sama juga terjadi pada sel *Thalassiosira* sp. dan *Chaetoceros gracilis* yang mengalami penurunan kandungan klorofil masing – masing sebanyak 89.95% dan 90.42% setelah terpapar Mikroplastik PVC selama 96 jam dengan konsentrasi yang sama (Wang *et al*, 2020). Penurunan kandungan klorofil A pada mikroalga *Microcystis flos-aquae* mencai 46.93% pada paparan Mikroplastik PVC dengan konsentrasi 500 mg/L dan 16.92% pada paparan Mikroplastik PP dengan konsentrasi yang sama (Wu *et al*, 2019). Sementara itu Yan *et al*, (2021) membandingkan Mikroplastik PS dengan dua ukuran yaitu 100 μ m dan 100 nm dan melihat dampaknya terhadap sintesis total kandungan klorofil dan karotenoid pada mikroalga *Chlamydomonas reinhardtii*. Hasil menunjukkan bahwa Mikroplastik PS dengan ukuran lebih kecil berpengaruh lebih besar terhadap penurunan kandung Karotenoid dan klorofil A yaitu masing – masing mencapai 72.6% dan 72.8%. kandungan klorofil A dalam sel ini secara langsung berkorelasi dengan kemampuan sel untuk berfotosintesis dan membentuk biomasnya. Berkurangnya kandungan klorofil A menandakan berkurangnya kapasitas mikroalga dalam melakukan fotosintesis sehingga hal ini juga akan berdampak pada terhambatnya pertumbuhan sel.

Aktivitas fotosintesis sel dapat diamati dengan menggunakan instrumen pulse-amplitude-modulated fluorometer yang akan mengkuantifikasi fluorescence yang dihasilkan klorofil saat proses fotosintesis terjadi (Brooks *et al*, 2011). Parameter

yang penting untuk mengukur aktivitas fotosintesis pada pusat reaksi Photosystem II (PSII) diantaranya adalah efisensi fotokimia (F_v/F_m), potensial aktivitas fotosintesis (F_v/F_0) dan efisiensi fotosintesis aktual (F_v'/F_m'). Penurunan nilai F_v/F_m , F_v/F_0 dan F_v'/F_m' menandakan telah terjadinya penghambatan fotosintesis oleh cahaya. Pada saat sel terpapar oleh Mikroplastik, transpor elektron antara q_a dan q_b (molekul quinone yang berperan sebagai penerima electron dari donor) menjadi terganggu sehingga terbentuk pusat reaksi PSII dengan q_b yang tidak tereduksi. Hal ini akan menyebabkan elektron terakumulasi dan memperburuk foto-inhibisi sehingga berakhir pada meningkatnya kadar *Reactive Oxygen Species* (ROS) dalam sel. Hasil penelitian Wang *et al*, (2020) menunjukkan penurunan nilai F_v/F_m pada mikroalga *P. tricornutum*, *C. gracilis*, dan *Thalassiosira* sp. saat dipaparkan Mikroplastik PS. Hal serupa juga diamati oleh Mao *et al*, (2018) untuk mikroalga *C. pyrenoidosa* dan Wu *et al*, (2019) untuk mikroalga *C. pyrenoidosa* dan *Microcystis flosaquae*.

Reactive oxygen species (ROS) yang merupakan molekul – molekul turunan oksigen yang berhubungan dengan proses aerobik dalam sel. Peningkatan jumlah ROS dalam sel berkorelasi dengan kerusakan molekuler dalam sel dan menghalangi biosintesis klorofil dan disebut dengan stress oksidatif (Geoffroy *et al*, 2003). *Chlamydomonas reinhardtii* mengalami peningkatan kadar ROS dalam sel hingga 130.2% saat terpapar Mikroplastik PS dengan konsentrasi 500 mg/L (Yan *et al*, 2021). Konsentrasi ROS pada mikroalga jenis *Phaeodactylum tricornutum* juga meningkat hingga 1.51 kali lipat saat terpapar Mikroplastik PS dengan konsentrasi 200 mg/L (Lang *et al*, 2022). Liu *et al*, (2019) juga melaporkan

peningkatan konsentrasi ROS hingga 1.8 kali lipat saat *Scenedesmus obliquus* dipaparkan dengan 50 mg/L Mikroplastik PS. Meningkatnya konsentrasi ROS dalam sel akan berhubungan dengan sel apoptosis dan peningkatan aktivitas enzyme antioksidan seperti *superoxide dismutase* (SOD), *peroxidase* (POD) and *catalase* (CAT). Peningkatan ROS juga akan berpengaruh pada peroksidasi lipid pada membrane sel, yang ditandai dengan meningkatnya kadar produk akhir dari peroksidasi lipid membrane sel yaitu malondialdehyde (MDA).

MEKANISME DETOKSIFIKASI SEL MIKROALGA

Sel mikroalga yang terpapar Mikroplastik maupun material asing lain pada umumnya seperti logam berat, nanopartikel ataupun bakteri dan virus patogen, akan melakukan mekanisme detoksifikasi sebagai bentuk pertahanan. Studi menunjukkan bahwa sel mikroalga dapat melakukan upaya detoksifikasi dengan beragam cara termasuk diantaranya dengan mensekresi EPS lebih banyak sehingga dinding sel menebal, membentuk vakuola sitoplasmik, membentuk aggregate dengan sesama sel mikroalga maupun dengan partikel Mikroplastik dan secara biokimia dengan meningkatkan aktivitas enzim yang berhubungan dengan detoksifikasi sel.

Penebalan dinding sel dengan meningkatkan sekresi EPS dapat membantu sel mikroalga mengurangi dampak negative Mikroplastik. Mikroplastik dapat menempel di permukaan EPS dan menahan Mikroplastik memasuki plasma sel. Penebalan ini juga dapat mengurangi kerusakan fisik yang dapat terjadi akibat paparan Mikroplastik. Mikroplastik dapat

menempel pada EPS dengan membentuk ikatan hydrogen ataupun melalui interaksi elektrostatik (Quigg *et al*, 2013). Interaksi antara EPS dan Mikroplastik akan mengurangi muatan permukaan dan ukuran diameter hidrodinamik Mikroplastik, sehingga mengurangi bioavailabilitas terhadap sel (Bellingeri *et al*, 2019). Namun karena pengaruh beberapa factor seperti ukuran partikel yang terlalu kecil (nanoplastik) dan muatan permukaan, partikel Mikroplastik dapat memasuki plasma sel meskipun sel telah melakukan mekanisme detoksifikasi dengan sekresi EPS. Partikel Mikroplastik dapat memasuki plasma sel mikroalga dengan mekanisme endositosis dan fagositosis (Long *et al*, 2017). Pada saat partikel sudah berada di dalam plasma, sel mikroalga dapat melakukan mekanisme pertahanan dengan membentuk sitoplasmik vakuola. Vakuola ini akan mengumpulkan partikel Mikroplastik dalam sel dan mencegahnya untuk berdifusi pada organel – organel sel penting lain, seperti kloroplas ataupun mitokondria. Namun vakuola sitoplasmik ini tidak akan selamanya bisa menahan partikel Mikroplastik, apabila tidak ada mekanisme khusus lain yang mampu mengeluarkan partikel dari dalam sel, maka sel dapat mengalami kematian.

Mekanisme lain yang dapat ditempuh oleh mikroalga sebagai system pertahanan adalah dengan membentuk aggregate dengan sesama sel mikroalga lain atau disebut dengan *homo-aggregation*. Saat sel – sel mikroalga membentuk aggregate, komunitas mikroalga tersebut melindungi sel dari kerusakan lebih lanjut. Agregasi sel ini membuat berkurangnya rasio luas permukaan dan volume sel sehingga menyebabkan jumlah partikel Mikroplastik yang dapat menempel pada sel berkurang (Chen *et al*, 2012). Sel

mikroalga juga dapat membentuk aggregate dengan partikel Mikroplastik, atau disebut dengan *hetero-aggregation*. Pembentukan aggregate antara sel mikroalga dan partikel Mikroplastik ini akan memfasilitasi Mikroplastik untuk terendapkan ke dasar perairan, sehingga mengurangi konsentrasi Mikroplastik di kolom air. Dengan demikian sel mikroalga yang masih tersuspensi di kolom air menjadi terhindar dari paparan Mikroplastik.

Selain itu, Mekanisme lain yang dapat dilakukan sel untuk menangani masuknya partikel Mikroplastik ke dalam sel adalah secara biokimia melalui aktivitas enzimatis sel. Pada saat partikel Mikroplastik menempel di dinding sel atau memasuki sel, reaksi fisiologi sel mikroalga akan terjadi termasuk meningkatnya kadar ROS dalam sel. Molekul oksigen reaktif ini akan menstimulus enzim antioksidan untuk meningkatkan aktivitasnya. Molekul oksigen reaktif ($\bullet\text{O}_2^-$) akan dikonversi oleh enzim SOD menjadi hydrogen peroksida (H_2O_2) yang merupakan radikal bebas (Suman *et al*, 2021). Hidrogen peroksida yang terbentuk ini kemudian akan dieliminasi dari dalam sel dengan bantuan enzim CAT dan POD dalam bentuk oksigen dan air (Li *et al*, 2016). Kuantifikasi enzim-enzim yang berhubungan dengan antioksidan tersebut dapat dijadikan indikator pada studi dampak paparan toksikan pada sel mikroalga. Dengan kata lain, aktivitas enzim ini dapat dikatakan sebagai salah satu bentuk pertahanan sel mikroalga akan paparan Mikroplastik.

KESIMPULAN

Paparan mikroplastik pada mikroalga menyebabkan gangguan fisiologi terutama dalam proses fotosintesis.

Penghambatan proses fotosintesis ini merupakan dampak yang paling umum dilaporkan pada studi paparan beberapa jenis dan ukuran serta konsentrasi mikroplastik terhadap beragam jenis mikroalga baik yang berasal dari air tawar maupun air laut. Mekanisme detoksifikasi seperti penebalan dinding sel, pembentukan vakuola, pembentukan aggregate maupun peningkatan aktivitas biokimiawi sel juga dilaporkan dapat dijadikan upaya pertahanan sel dalam melawan mikroplastik. Efek negatif mikroplastik pada mikroalga perlu dikaji lebih lanjut untuk lebih memahami bagaimana mikroplastik berinteraksi dengan sel mikroalga maupun material lainnya yang secara alami berada di perairan.

DAFTAR PUSTAKA

- Argiandini, D. M. (2023). Identifikasi Kelimpahan Mikroplastik di Sekitar Perairan Provinsi Gorontalo. *Environmental Pollution Journal*, 3(1), 582-588.
- Auta, H. S., Emenike, C. U., & Fauziah, S. H. (2017). Distribution and importance of microplastics in the marine environment: a review of the sources, fate, effects, and potential solutions. *Environment international*, 102, 165-176.
- Ayuningtyas, W. C., Yona, D., Julinda, S. H., & Iranawati, F. (2019). Kelimpahan Mikroplastik Pada Perairan Di Banyuwirip, Gresik, Jawa Timur. *JFMR (Journal of Fisheries and Marine Research)*, 3(1), 41-45.
- Barnes, J., Balestra, B., Knee, K. L., Frederick, J. A., Landaverde, N., & Meiller, J. (2024). Freshwater algal biofilm assemblages are more effective than invertebrate

- assemblages at aggregating microplastics. *Heliyon*, 10(1).
- Bellingeri, A., Bergami, E., Grassi, G., Faleri, C., Redondo-Hasselerharm, P., Koelmans, A. A., & Corsi, I. (2019). Combined effects of nanoplastics and copper on the freshwater alga *Raphidocelis subcapitata*. *Aquatic Toxicology*, 210, 179-187.
- Bråte, Inger Lise N., David P. Eidsvoll, Calin Constantin Steindal, and Kevin V. Thomas. "Plastic ingestion by Atlantic cod (*Gadus morhua*) from the Norwegian coast." *Marine pollution bulletin* 112, no. 1-2 (2016): 105-110.
- Brooks, M. D., & Niyogi, K. K. (2011). Use of a pulse-amplitude modulated chlorophyll fluorometer to study the efficiency of photosynthesis in *Arabidopsis* plants. In *Chloroplast Research in Arabidopsis* (pp. 299-310). Humana Press, Totowa, NJ.
- Chen, P., Powell, B. A., Mortimer, M., & Ke, P. C. (2012). Adaptive interactions between zinc oxide nanoparticles and *Chlorella* sp. *Environmental Science & Technology*, 46(21), 12178-12185.
- Cokrowati, N., Amir, S., Abidin, Z., Setyono, B. D. H., & Damayanti, A. A. (2014). Kelimpahan dan komposisi fitoplankton di perairan Teluk Kodek Pemenang Lombok Utara. *Depik*, 3(1).
- Gambardella, C., Morgana, S., Bramini, M., Rotini, A., Manfra, L., Migliore, L., ... & Faimali, M. (2018). Ecotoxicological effects of polystyrene microbeads in a battery of marine organisms belonging to different trophic levels. *Marine environmental research*, 141, 313-321.
- Geoffroy, L., Dewez, D., Vernet, G., & Popovic, R. (2003). Oxyfluorfen toxic effect on *S. obliquus* evaluated by different photosynthetic and enzymatic biomarkers. *Archives of environmental contamination and toxicology*, 45(4), 445-452.
- Gewert, B., Plassmann, M. M., & MacLeod, M. (2015). Pathways for degradation of plastic polymers floating in the marine environment. *Environmental science: processes & impacts*, 17(9), 1513-1521.
- Global Plastic Action Partnership. (2022). Radically Reducing Plastic Pollution in Indonesia: A Multistakeholder Action Plan National Plastic Action Partnership. World Economic Forum: Indonesia.
- Guo, Z., Li, J., & Zhang, Z. (2024). Meta-analysis for systematic review of global micro/nano-plastics contamination versus various freshwater microalgae: Toxicological effect patterns, taxon-specific response, and potential eco-risks. *Water Research*, 258, 121706.
- Handyman, D. I. W., Purba, N. P., Pranowo, W. S., Harahap, S. A., Dante, I. F., & Yuliadi, L. P. S. (2019). Microplastics Patch Based on Hydrodynamic Modeling in The North Indramayu, Java Sea. *Polish Journal of Environmental Studies*, 28(1).
- Hanif, K. H., Suprijanto, J., & Pratikto, I. (2021). Identifikasi Mikroplastik di Muara Sungai Kendal, Kabupaten Kendal. *Journal of Marine Research*, 10(1), 1-6.
- Hidayati, N. V., Rahma, S., Nurhakim, A. N., & Hadiyawati, U. (2022). Komposisi Dan Distribusi Makro-Dan Meso-Plastik Di Sungai Keruh, Bumiayu, Kabupaten Brebes. *Jurnal Perikanan Dan Kelautan*, 12(2), 117-131.
- Jambeck, J. R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T. R., Perryman, M.,

- Andrady, A., ... & Law, K. L. (2015). Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*, 347(6223), 768-771.
- Labibah, W., & Triajie, H. (2020). Keberadaan mikroplastik pada ikan swanggi (*priacanthus tayenus*), sedimen dan air laut di PERAIRAN Pesisir Brondong, Kabupaten Lamongan. *Juvenil: Jurnal Ilmiah Kelautan Dan Perikanan*, 1(3), 351-358.
- Lagarde, F., Olivier, O., Zanella, M., Daniel, P., Hiard, S., & Caruso, A. (2016). Microplastic interactions with freshwater microalgae: hetero-aggregation and changes in plastic density appear strongly dependent on polymer type. *Environmental pollution*, 215, 331-339.
- Lang, X., Ni, J., & He, Z. (2022). Effects of polystyrene microplastic on the growth and volatile halocarbons release of microalgae *Phaeodactylum tricornutum*. *Marine pollution bulletin*, 174, 113197.
- Lechner, A., Keckeis, H., Lumesberger-Loisl, F., Zens, B., Krusch, R., Tritthart, M., ... & Schludermann, E. (2014). The Danube so colourful: a potpourri of plastic litter outnumber fish larvae in Europe's second largest river. *Environmental pollution*, 188, 177-181.
- Leslie, H. A., van Velzen, M. J., Brandsma, S. H., Vethaak, D., Garcia-Vallejo, J. J., & Lamoree, M. H. (2022). Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood. *Environment International*, 107199.
- Li, J., Zheng, X., Liu, K., Sun, S., & Li, X. (2016). Effect of tetracycline on the growth and nutrient removal capacity of *Chlamydomonas reinhardtii* in simulated effluent from wastewater treatment plants. *Bioresource technology*, 218, 1163-1169.
- Liu, G., Jiang, R., You, J., Muir, D. C., & Zeng, E. Y. (2019). Microplastic impacts on microalgae growth: effects of size and humic acid. *Environmental Science & Technology*, 54(3), 1782-1789.
- Long, M., Paul-Pont, I., Hegaret, H., Moriceau, B., Lambert, C., Huvet, A., & Soudant, P. (2017). Interactions between polystyrene microplastics and marine phytoplankton lead to species-specific hetero-aggregation. *Environmental Pollution*, 228, 454-463.
- Luo, H., Xiang, Y., He, D., Li, Y., Zhao, Y., Wang, S., & Pan, X. (2019). Leaching behavior of fluorescent additives from microplastics and the toxicity of leachate to *Chlorella vulgaris*. *Science of the Total Environment*, 678, 1-9.
- Mao, Y., Ai, H., Chen, Y., Zhang, Z., Zeng, P., Kang, L., ... & Li, H. (2018). Phytoplankton response to polystyrene microplastics: perspective from an entire growth period. *Chemosphere*, 208, 59-68.
- Montoya, D., Rastelli, E., Casotti, R., Manna, V., Trano, A. C., Balestra, C., ... & Brunet, C. (2024). Microplastics alter the functioning of marine microbial ecosystems. *Ecology and Evolution*, 14(11), e70041.
- Nainggolan, D. H., Indarjo, A., & Suryono, C. A. (2022). Mikroplastik yang Ditemukan di Perairan Karangjahe, Rembang, Jawa Tengah. *Journal of Marine Research*, 11(3), 374-382.
- Nugroho, D. H., Restu, I. W., & Ernawati, N. M. (2018). Kajian Kelimpahan Mikroplastik di Perairan Teluk Benoa Provinsi Bali. *Current Trends in Aquatic Science*, 1(1), 80-88.

- Parsai, T., Figueiredo, N., Dalvi, V., Martins, M., Malik, A., & Kumar, A. (2022). Implication of microplastic toxicity on functioning of microalgae in aquatic system. *Environmental Pollution*, 308, 119626.
- Permana, R., Rizal, A., & Hasan, Z. (2020). Plastic Consumption in Group of Teens and Young Adults from Pangandaran District, Indonesia: A Glimpse of Environmental Awareness among the Locals outside Big Cities. *Asian Journal of Advanced Research and Reports*, 12(2), 1-9.
- Permana, R., Apriliani, I. M., & Rizal, A. (2022). Peningkatan Kesadaran Masyarakat Desa Cintaratu Kabupaten Pangandaran Sebagai Wilayah Hulu Akan Dampak Dan Bahaya Sampah Plastik Terhadap Ekosistem Pesisir. *Farmers: Journal of Community Services*, 3(1), 20-24.
- PlasticEurope. (2023). Plastics - the fast fact 2023.
- Prata, J. C., da Costa, J. P., Lopes, I., Duarte, A. C., & Rocha-Santos, T. (2019). Effects of microplastics on microalgae populations: a critical review. *Science of The Total Environment*, 665, 400-405.
- Prayoga, L. B., & Sartimbul, A. (2024). Peta Sebaran dan Kelimpahan Mikroplastik di Muara Sungai Wonorejo dan Sungai Tambak Wedi Surabaya. *Environmental Pollution Journal*, 4(2), 1023-1032.
- Quigg, A., Chin, W. C., Chen, C. S., Zhang, S., Jiang, Y., Miao, A. J., ... & Santschi, P. H. (2013). Direct and indirect toxic effects of engineered nanoparticles on algae: role of natural organic matter. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 1(7), 686-702.
- Rahmat, S. L., Purba, N. P., Agung, M. U., & Yuliadi, L. P. (2019). Karakteristik sampah mikroplastik di muara Sungai DKI Jakarta. *Depik*, 8(1), 9-17.
- Rillig, Matthias C., Anika Lehmann, A. Abel de Souza Machado, and Gaowen Yang. "Microplastic effects on plants." *New Phytologist* 223, no. 3 (2019): 1066-1070.
- Rizal, A., Apriliani, I. M., & Permana, R. (2021). Peningkatan Kesadaran Masyarakat Pesisir Pangandaran dalam Menangani Dampak Sampah di Lingkungan Pesisir. *Farmers: Journal of Community Services*, 2(1), 24-29.
- Rohmaniyah, L., Widowati, I., & Nuraini, R. A. T. (2024). Kandungan Mikroplastik pada Rajungan (*Portunus pelagicus*), Air Laut, dan Sedimen Di Perairan Desa Gugunung Wetan Kabupaten Rembang, Jawa Tengah. *Buletin Oseanografi Marina*, 13(1), 1-12.
- Seftianingrum, B., Hidayati, I., & Zummah, A. (2023). Identifikasi Mikroplastik pada Air, Sedimen, dan Ikan Nila (*Oreochromis niloticus*) di Sungai Porong, Kabupaten Sidoarjo, Jawa Timur. *Jurnal Jeumpa*, 10(1), 68-82.
- Seoane, M., González-Fernández, C., Soudant, P., Huvet, A., Esperanza, M., Cid, Á., & Paul-Pont, I. (2019). Polystyrene microbeads modulate the energy metabolism of the marine diatom *Chaetoceros neogracile*. *Environmental Pollution*, 251, 363-371.
- Septiari, I. A. P. W., & Kartowasono, N. (2017). Pembuatan Papan Partikel dari Limbah Plastik Polypropylene (PP) dan Tangkai Bambu. *Jurnal Pendidikan Kimia Undiksha*, 1(1).
- Su, L., Xue, Y., Li, L., Yang, D., Kolandhasamy, P., Li, D., & Shi, H. (2016). Microplastics in taihu lake,

- China. *Environmental Pollution*, 216, 711-719.
- Suhardi, H. R. P. (2024). Identifikasi Cemaran Mikroplastik di Kolam Kebun Raya Purwodadi Pasuruan. *Environmental Pollution Journal*, 4(1), 977-983.
- Suman, K. H., Haque, M. N., Uddin, M. J., Begum, M. S., & Sikder, M. H. (2021). Toxicity and biomarkers of micro-plastic in aquatic environment: a review. *Biomarkers*, 26(1), 13-25.
- Tampubolon, A. J., Budijono, B., & Fauzi, M. (2024). Kandungan Mikroplastik Pada Kolom Air di Sungai Siak Provinsi Riau. *Jurnal Fisika Unand*, 13(2), 218-224.
- Wang, S., Wang, Y., Liang, Y., Cao, W., Sun, C., Ju, P., & Zheng, L. (2020). The interactions between microplastic polyvinyl chloride and marine diatoms: Physiological, morphological, and growth effects. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 203, 111000.
- Wu, Yanmei, Peiyong Guo, Xiaoyan Zhang, Yuxuan Zhang, Shuting Xie, and Jun Deng. "Effect of microplastics exposure on the photosynthesis system of freshwater algae." *Journal of hazardous materials* 374 (2019): 219-227.
- Yan, Z., Xu, L., Zhang, W., Yang, G., Zhao, Z., Wang, Y., & Li, X. (2021). Comparative toxic effects of microplastics and nanoplastics on *Chlamydomonas reinhardtii*: Growth inhibition, oxidative stress, and cell morphology. *Journal of Water Process Engineering*, 43, 102291.
- Zantis, L. J., Carroll, E. L., Nelms, S. E., & Bosker, T. (2021). Marine mammals and microplastics: A systematic review and call for standardisation. *Environmental Pollution*, 269, 116142.
- Zhang, C., Chen, X., Wang, J., & Tan, L. (2017). Toxic effects of microplastic on marine microalgae *Skeletonema costatum*: interactions between microplastic and algae. *Environmental pollution*, 220, 1282-1288.
- Zhang, Q., Xu, E. G., Li, J., Chen, Q., Ma, L., Zeng, E. Y., & Shi, H. (2020). A review of microplastics in table salt, drinking water, and air: direct human exposure. *Environmental science & technology*, 54(7), 3740-3751.