

MIKROPLASTIK DALAM KEDOKTERAN GIGI

Jackson Dipankara

MIKROPLASTIK DALAM KEDOKTERAN GIGI

Jackson Dipankara
Rahmi Amtha
Joko Kusnoto
Rosalina Tjandrawinata
Ferry Sandra

MIKROPLASTIK DALAM KEDOKTERAN GIGI

Sanksi Pelanggaran Pasal 113
Undang-Undang No. 28 Tahun 2014 tentang Hak Cipta

1. Setiap Orang yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp100.000.000 (seratus juta rupiah).
2. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).
3. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf a, huruf b, huruf e, dan/atau huruf g untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 4 (empat) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp1.000.000.000,00 (satu miliar rupiah).
4. Setiap Orang yang memenuhi unsur sebagaimana dimaksud pada ayat (3) yang dilakukan dalam bentuk pembajakan, dipidana dengan pidana penjara paling lama 10 (sepuluh) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp4.000.000.000,00 (empat miliar rupiah).

MIKROPLASTIK DALAM KEDOKTERAN GIGI

Jackson Dipankara

Rahmi Amtha

Joko Kusnoto

Rosalina Tjandrawinata

Ferry Sandra



MIKROPLASTIK DALAM KEDOKTERAN GIGI

**Diterbitkan pertama kali oleh Penerbit Arta Media Nusantara
Hak cipta dilindungi oleh undang-undang *All Rights Reserved*
Hak penerbitan pada Penerbit Arta Media Nusantara
Dilarang mengutip atau memperbanyak sebagian atau seluruh
isi buku ini tanpa seizin tertulis dari Penerbit**

**Anggota IKAPI
NO.265/JTE/2023**

Cetakan Pertama: Mei 2026
B5 (17,5 X 25 cm)

ISBN:
978-634-7727-34-3

Penulis:
Jackson Dipankara, Rahmi Amtha, Joko Kusnoto,
Rosalina Tjandrawinata, Ferry Sandra

Editor:
Rofiq Priyanto

Desain Cover:

Tata Letak:
Fadhilah Larasanti

Diterbitkan Oleh:
Penerbit Arta Media Nusantara

Jalan Kebocoran, Gang Jalak No. 52, Karangsalam Kidul,
Kedungbanteng, Banyumas, Jawa Tengah
Email: artamediantara.co@gmail.com
Website: <http://artamedia.co/>
Whatsapp : 081-392-189-880

PRAKATA

Puji syukur kami panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa, atas rahmat dan karunia-Nya sehingga buku *Mikroplastik dalam Kedokteran Gigi* ini dapat disusun dan diselesaikan dengan baik. Buku ini hadir sebagai respons atas meningkatnya perhatian global terhadap isu mikroplastik yang tidak hanya berdampak pada lingkungan, tetapi juga mulai menjadi perhatian serius dalam bidang kesehatan, termasuk kedokteran gigi.

Perkembangan ilmu dan teknologi dalam kedokteran gigi telah membawa banyak kemajuan, khususnya dalam penggunaan material berbasis polimer yang memberikan kemudahan dan efektivitas dalam perawatan. Namun, di balik manfaat tersebut, muncul tantangan baru berupa potensi paparan mikroplastik yang belum sepenuhnya dipahami dampaknya terhadap kesehatan manusia dan ekosistem. Oleh karena itu, buku ini disusun untuk memberikan pemahaman yang komprehensif, kritis, dan berimbang mengenai isu tersebut.

Penulis berupaya menyajikan materi secara sistematis dan mudah dipahami, mulai dari konsep dasar mikroplastik, sumber dan jalur paparan dalam praktik kedokteran gigi, hingga implikasi biologis dan lingkungan yang ditimbulkan. Tidak hanya itu, buku ini juga menawarkan perspektif solusi melalui pendekatan kedokteran gigi berkelanjutan, sebagai bentuk tanggung jawab profesi terhadap kesehatan pasien dan kelestarian lingkungan.

Buku ini diharapkan dapat menjadi referensi yang bermanfaat bagi mahasiswa, akademisi, praktisi kedokteran gigi, serta pembaca umum yang memiliki perhatian terhadap isu

kesehatan dan lingkungan. Penulis menyadari bahwa buku ini masih memiliki keterbatasan, oleh karena itu kritik dan saran yang konstruktif sangat diharapkan demi penyempurnaan di masa yang akan datang.

Akhir kata, semoga buku ini dapat memberikan kontribusi nyata dalam pengembangan ilmu kedokteran gigi yang lebih berkelanjutan dan berwawasan lingkungan.

Selamat membaca.

DAFTAR ISI

PRAKATA	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR	viii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
BAB 2 Mikroplastik.....	7
A. Definisi.....	10
B. Jenis-jenis mikroplastik	13
C. Mikroplastik dalam kedokteran gigi	15
D. Efek mikroplastik terhadap kesehatan manusia.....	29
BAB 3 Cara Mendeteksi Mikroplastik	49
BAB 4 Resin Akrilik Dan Resin Komposit	69
A. Resin akrilik.....	69
B. Resin komposit.....	74
BAB 5 Mikroplastik dalam Sampel: Identifikasi dan Pengukuran	78
A. Identifikasi mikroplastik	82
BAB 6 PENUTUP	92
DAFTAR PUSTAKA.....	94
PROFIL PENULIS.....	116

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Mikroplastik ²⁸	12
Gambar 2. Jalur masuk mikroplastik ⁴¹	32
Gambar 3. (A) Potensi mikroplastik ukuran 0,1-10 mikrometer uptake dan clearance. (B) jika partikel di udara dari mikroplastik memungkinkan deposisi lebih dalam di paru-paru, maka dapat menembus lapisan paru-paru yang tipis kemudian mengalami translokasi melalui ⁷⁸	37
Gambar 4. (A) mikroplastik uptake melalui saluran pencernaan secara endocytosis oleh sel M, (B) mikroplastik uptake melalui lumen saluran pencernaan secara paracellular persorption ⁹⁴	43
Gambar 5. Pengaruh mikroplastik terhadap kesehatan ⁹³	45
Gambar 6. Jalur masuk mikroplastik ⁴⁰	46
Gambar 7. Prosedur penggunaan Nile Red	81
Gambar 8. Hasil identifikasi mikroplastik menggunakan mikroskop fluoresen light filters biru dan light filters hijau (a) pada kontrol positif resin akrilik, (b) pada kontrol positif resin komposit, dan (c) kontrol negatif.	83
Gambar 9. Hasil identifikasi mikroplastik resin akrilik menggunakan mikroskop fluoresen light filters biru dan light filters hijau (a) pada perlakuan penyikatan, (b) pada perlakuan perubahan suhu, (c) pada perlakuan perubahan pH	84

Gambar 10. Hasil identifikasi mikroplastik resin komposit menggunakan mikroskop fluoresen light filters biru dan light filters hijau (a) pada perlakuan penyikatan, (b) pada perlakuan perubahan suhu, (c) pada perlakuan perubahan pH..... 86

BAB I

PENDAHULUAN

Mikroplastik merupakan partikel plastik berukuran sangat kecil, dengan rentang ukuran kurang dari 1 nanometer hingga mencapai 5 milimeter.¹ Berdasarkan asal terbentuknya, mikroplastik dibedakan menjadi dua jenis, yaitu mikroplastik primer dan mikroplastik sekunder. Mikroplastik primer mengacu pada partikel plastik berukuran kecil yang sengaja diproduksi untuk kebutuhan industri dan digunakan sebagai bahan penyusun berbagai produk, seperti pembersih tangan, kosmetik, bahan abrasif, serta produk lainnya.² Sementara itu, mikroplastik sekunder terbentuk akibat proses fragmentasi atau degradasi plastik berukuran lebih besar yang mengalami pelapukan karena paparan lingkungan, gesekan, abrasi, maupun kerusakan fisik lainnya sehingga berubah menjadi partikel-partikel yang lebih kecil.³

Mikroplastik telah ditemukan pada berbagai sumber paparan sehari-hari, seperti air, bahan pangan, air minum, produk makanan kemasan, hingga air keran yang dikonsumsi masyarakat.^{4,5} Partikel ini dapat masuk ke dalam tubuh manusia melalui berbagai mekanisme paparan, dan mikroplastik berukuran kurang dari 130 mikrometer diketahui memiliki kemampuan untuk menembus jaringan tubuh sehingga berpotensi menyebabkan perubahan seluler, memicu toksisitas lokal maupun sistemik, serta menimbulkan dampak terhadap

kesehatan.⁶ Dalam konteks kedokteran gigi, penggunaan material yang mengandung komponen plastik cukup luas dan menjadi bagian penting dalam berbagai prosedur perawatan. Beberapa contohnya meliputi bahan resin untuk restorasi gigi, *fissure sealant*, gigi tiruan berbahan resin akrilik, plat ortodonti, serta bahan abrasif yang digunakan pada proses pemolesan gigi.⁷ Kondisi ini menunjukkan bahwa bidang kedokteran gigi juga memiliki potensi berkontribusi terhadap paparan mikroplastik, baik bagi manusia maupun lingkungan sekitar.⁷

Partikel mikroplastik dengan ukuran lebih dari 0,01 mm hingga kurang dari 5 mm berpotensi terhirup melalui saluran pernapasan dan mencapai alveolus paru-paru untuk kemudian terserap ke dalam tubuh. Paparan mikroplastik secara terus-menerus dalam jangka panjang, terutama partikel berukuran mikro hingga nano, diketahui dapat memicu efek toksik baik secara lokal maupun sistemik.⁸ Nano partikel dengan ukuran kurang dari 100 nanometer bahkan memiliki kemampuan masuk ke dalam aliran darah maupun sistem limfatik sehingga meningkatkan risiko terjadinya toksisitas sistemik.⁸ Penelitian oleh Syakti dkk. menunjukkan bahwa mikroplastik dapat bermigrasi ke berbagai organ tubuh dan berpotensi memengaruhi kondisi kesehatan secara umum, sementara paparan berulang diduga mampu memicu respons imun meskipun mekanisme biologisnya belum dipahami sepenuhnya.⁹ Kehadiran mikroplastik dalam tubuh juga dikaitkan dengan terjadinya inflamasi jaringan, proliferasi sel yang tidak normal, nekrosis, hingga gangguan fungsi sistem imun.¹⁰ Selain dampak biologis tersebut, partikel plastik dapat menyebabkan cedera fisik seperti erosi atau ulserasi pada saluran pencernaan.¹¹ Pada lingkungan dengan tingkat polusi udara tinggi, mikroplastik yang terhirup juga berpotensi meningkatkan risiko gangguan sistem pernapasan serta penyakit kardiopulmoner.¹² Studi lain menyebutkan bahwa

mikroplastik berukuran nano dapat memicu kerusakan DNA karena ukurannya yang sangat kecil memungkinkan partikel tersebut memasuki sirkulasi tubuh secara lebih mudah.¹¹ Sementara itu, akumulasi mikroplastik di usus dilaporkan dapat meningkatkan ekspresi sitokrom P450 yang berhubungan dengan perubahan proses metabolisme akibat paparan mikroplastik.¹³ Peningkatan aktivitas sitokrom P450 menjadi perhatian karena enzim ini berperan dalam aktivasi senyawa karsinogen tertentu, termasuk hidrokarbon aromatik polisiklik dan amina heterosiklik, yang diketahui terlibat dalam proses perkembangan kanker usus melalui efek genotoksik.¹⁴

Salah satu material yang paling banyak digunakan dalam tindakan restorasi gigi adalah resin komposit, dengan tingkat penggunaan mencapai sekitar 80% dalam praktik kedokteran gigi.¹⁵ Bahan restorasi berbasis resin komposit tersebut mengandung komponen plastik yang dalam pemakaian jangka panjang berpotensi mengalami degradasi menjadi partikel mikroplastik. Proses degradasi ini dapat dipengaruhi oleh berbagai aktivitas di dalam rongga mulut, seperti proses mengunyah dan menyikat gigi, serta faktor lingkungan oral lainnya, termasuk perubahan suhu dan fluktuasi pH yang terjadi secara terus-menerus.^{15,16} Kondisi tersebut menunjukkan adanya kemungkinan pelepasan mikroplastik dari material restorasi selama masa penggunaan, sehingga berpotensi menimbulkan paparan terhadap jaringan di sekitar rongga mulut.¹⁶

Studi yang dilakukan oleh Szczesio-Wlodarczyk dkk.¹⁶ serta Opdam dkk.¹⁷ terkait tingkat kegagalan restorasi resin komposit menunjukkan bahwa kerusakan atau penurunan fungsi material restorasi umumnya mulai terjadi pada sekitar tahun keenam setelah prosedur penambalan dilakukan.^{16,17} Temuan dari studi longitudinal selama delapan tahun juga mengindikasikan bahwa tanda-tanda kerusakan awal pada

restorasi resin komposit dapat muncul lebih cepat, yaitu sejak tahun ketiga hingga sebelum memasuki tahun keenam pasca penambalan.¹⁸ Hasil tersebut menggambarkan bahwa daya tahan resin komposit cenderung menurun seiring lamanya penggunaan di rongga mulut, yang dipengaruhi oleh paparan mekanis maupun kondisi lingkungan oral secara berkelanjutan.^{16,18}

Selain resin komposit, material kedokteran gigi lain yang mengandung komponen plastik dan banyak digunakan adalah resin akrilik. Bahan ini umumnya dimanfaatkan sebagai material pembuatan basis gigi tiruan, piranti ortodonti lepasan, mahkota sementara, serta prosedur *relining* pada gigi tiruan.¹⁹ Dalam penggunaannya di rongga mulut, resin akrilik secara terus-menerus terpapar oleh saliva, makanan, minuman, maupun bahan pembersih yang digunakan selama perawatan. Paparan berulang terhadap berbagai faktor tersebut dilaporkan dapat memengaruhi karakteristik permukaan material dan berpotensi menyebabkan terjadinya degradasi atau penurunan kualitas permukaan resin akrilik seiring waktu.²⁰ Kondisi ini menunjukkan bahwa material berbasis resin akrilik memiliki kemungkinan mengalami perubahan fisik selama masa pemakaian klinis.²⁰

Berdasarkan data RISKESDAS tahun 2007, penggunaan gigi tiruan di Indonesia tercatat mencapai 4,5% dari total populasi, dengan prevalensi tertinggi sebesar 14,5% ditemukan pada kelompok usia 65 tahun.²¹ Sebelas tahun kemudian, hasil RISKESDAS 2018 menunjukkan adanya peningkatan penggunaan gigi tiruan, yaitu sebesar 23,3% untuk gigi tiruan sebagian lepasan, 10% untuk gigi tiruan penuh, dan 4,7% untuk gigi tiruan cekat.²² Peningkatan angka tersebut mengindikasikan semakin besarnya kebutuhan masyarakat terhadap rehabilitasi fungsi oral melalui penggunaan gigi tiruan. Moreno dkk. melaporkan bahwa sekitar setengah dari gigi tiruan

berbahan resin akrilik memerlukan penggantian setelah digunakan selama lima tahun.²³ Sementara itu, penelitian oleh Bukleta dkk.²⁴ dan Pjetursson dkk.²⁵ menunjukkan bahwa masa pakai gigi tiruan lepasan berbahan akrilik di rongga mulut dapat bertahan antara 5,1 hingga 10,6 tahun, bergantung pada kondisi penggunaan dan faktor klinis lainnya. Temuan tersebut menggambarkan bahwa material akrilik yang digunakan dalam jangka panjang berpotensi mengalami penurunan kualitas sehingga memerlukan perbaikan atau penggantian seiring waktu.^{23,25}

Tenaga medis, khususnya dokter gigi, serta pasien sama-sama memiliki potensi terpapar mikroplastik, meskipun dengan durasi dan intensitas paparan yang berbeda. Pada pasien, paparan dapat dimulai sejak dilakukan prosedur perawatan menggunakan bahan kedokteran gigi berbasis plastik dan berlanjut selama material tersebut masih berada di dalam rongga mulut dalam jangka waktu tertentu. Sementara itu, dokter gigi berpotensi mengalami paparan secara berulang dan lebih kontinu karena penggunaan bahan berbasis plastik merupakan bagian dari aktivitas klinis sehari-hari. Kondisi tersebut menyebabkan tenaga medis kemungkinan menerima akumulasi paparan yang lebih tinggi dibandingkan pasien, sehingga berpotensi meningkatkan risiko munculnya dampak kesehatan akibat paparan mikroplastik dalam jangka panjang.²⁶

Berbagai teknik telah dikembangkan untuk mengidentifikasi keberadaan mikroplastik, mulai dari metode sederhana melalui pengamatan visual dan pemisahan manual tanpa bantuan mikroskop, hingga metode yang memanfaatkan zat pewarna atau fluoresen untuk meningkatkan akurasi deteksi.²⁷ Beberapa jenis pewarna yang umum digunakan dalam identifikasi mikroplastik meliputi *Oil Red EGN*, *Eosin B*, *Rose Bengal*, *Hostasol Yellow 3G*, dan *Nile Red*. Hasil sejumlah penelitian menunjukkan bahwa *Nile Red* merupakan salah satu

larutan pewarna yang paling efektif dalam mendeteksi mikroplastik karena memiliki kemampuan yang baik untuk mengidentifikasi partikel pada berbagai jenis sampel. Metode ini dapat diaplikasikan baik pada sediaan berbentuk cair maupun padat, sehingga banyak digunakan dalam penelitian terkait analisis keberadaan mikroplastik.^{5,28,29}

Sampai saat ini, kajian yang secara khusus mengevaluasi perbedaan pengaruh berbagai aktivitas serta kondisi di rongga mulut terhadap pelepasan mikroplastik dari bahan resin akrilik dan resin komposit masih sangat terbatas. Berbagai faktor di dalam rongga mulut yang diduga berperan terhadap proses pelepasan tersebut meliputi aktivitas penyikatan gigi, perubahan suhu, serta fluktuasi pH yang terjadi secara berulang selama penggunaan material kedokteran gigi. Kondisi-kondisi tersebut berpotensi memengaruhi degradasi permukaan bahan restorasi maupun bahan akrilik, sehingga memungkinkan terjadinya pelepasan partikel mikroplastik dalam jangka panjang.

BAB 2

MIKROPLASTIK

Polimer sintetis mulai muncul pada akhir abad ke-19 sekitar tahun 1860-an, namun baru setelah Perang Dunia II “plastik” benar-benar mulai populer. Polimer sintetis yang dimaksud adalah plastik. Plastik telah menjadi salah satu material yang paling luas penggunaannya, sejak awal kemunculannya sebagai resin fenol-formaldehida (yaitu Bakelit). Pada dasarnya, plastik dirancang untuk meningkatkan kualitas hidup manusia, namun saat ini justru menjadi ancaman nyata bagi lingkungan dan kelestarian lingkungan.³⁰

Saat ini, plastik tersebar luas di seluruh kompartemen lingkungan (udara, air, dan tanah), terutama karena sebagian besar kemasan pangan yang beredar di pasaran—seperti untuk produk susu, daging, ikan, maupun minuman termasuk air mineral—terbuat dari plastik. Kontak antara pangan dan kemasan plastik hampir selalu menyebabkan terjadinya perpindahan zat secara timbal balik antara wadah dan isinya. Kualitas produk pangan dipengaruhi oleh kontaminasi akibat interaksi dengan zat-zat yang terdapat dalam komposisi kemasan, bahkan dalam beberapa kasus dapat menyebabkan penurunan kualitas nutrisi sekaligus memengaruhi keamanan konsumsi.³⁰

Keberadaan mikroplastik telah terdeteksi dalam ekosistem tanah, perairan permukaan, sedimen pesisir, pasir pantai, sedimen air tawar, serta lingkungan laut dalam; bahkan

hujan dan salju pun mengandung sejumlah besar mikroplastik yang terkadang tidak terlihat oleh mata telanjang. Eksploitasi plastik secara intensif yang disertai dengan buruknya kinerja sistem pengelolaan limbah, termasuk pengumpulan dan penanganan akhir, telah menyebabkan akumulasi besar limbah plastik di lingkungan. Pelepasan material plastik ke lingkungan kini diakui sebagai salah satu masalah pencemaran yang signifikan.³⁰

Plastik telah digunakan secara luas di seluruh dunia karena daya tahannya, biaya yang relatif rendah, serta berbagai keunggulan lainnya. Namun demikian, meskipun konsumsi material plastik sangat tinggi, hanya sekitar 20% limbah plastik yang didaur ulang atau dimusnahkan melalui insinerasi, sementara sebagian besar lainnya dibuang ke tempat pembuangan akhir atau tersebar di lingkungan alami. Produksi limbah plastik global terus meningkat seiring dengan bertambahnya produksi plastik. Berdasarkan data dari *Plastics Europe*, diproyeksikan bahwa pada tahun 2050 jumlah limbah plastik global dapat mencapai sekitar 2,4 miliar ton, lebih dari enam kali lipat dibandingkan volume yang dihasilkan pada tahun 2020.³¹

Karena sifatnya yang resisten terhadap degradasi, plastik dapat bertahan di lingkungan selama puluhan hingga ratusan tahun, dan akan terurai menjadi fragmen yang lebih kecil melalui berbagai proses seperti abrasi fisik, reaksi kimia, serta degradasi biologis.³¹

Meskipun plastik dikenal memiliki sifat persisten di lingkungan, ketika material ini memasuki ekosistem, plastik akan mengalami berbagai proses degradasi, seperti pelapukan kimia (chemical weathering), fotodegradasi akibat paparan sinar ultraviolet, biodegradasi oleh mikroorganisme, serta pengaruh gaya mekanik yang secara bertahap melemahkan integritas strukturnya. Proses-proses tersebut menyebabkan

plastik terfragmentasi menjadi partikel-partikel berukuran sangat kecil, mulai dari skala mikrometer hingga nanometer. Paparan manusia terhadap mikroplastik dapat terjadi melalui berbagai jalur, termasuk inhalasi partikel yang terdapat di udara maupun melalui kontak dermal. Di lingkungan perairan dan tanah, mikroplastik juga memiliki kemampuan untuk mengadsorpsi dan mengakumulasi berbagai polutan, seperti logam berat dan senyawa organik berbahaya. Partikel-partikel ini kemudian dapat masuk ke dalam rantai makanan melalui konsumsi air minum dan produk pertanian, yang selanjutnya berpotensi mengalami biomagnifikasi pada tingkat trofik yang lebih tinggi. Akumulasi ini menimbulkan kekhawatiran serius terhadap dampaknya bagi kesehatan manusia.³²

Degradasi limbah plastik menghasilkan partikel mikroplastik (MP) maupun nanoplastik (NP). Klasifikasi ini didasarkan pada diameter fragmen atau partikel plastik, di mana mikroplastik memiliki diameter kurang dari 5 mm, sedangkan nanoplastik memiliki diameter berkisar antara 1 hingga 100 atau 1000 nm. Terkait ukuran diameter partikel plastik, literatur ilmiah menyediakan informasi yang lebih rinci serta berbagai klasifikasi tambahan mengenai mikroplastik.² Mikroplastik (MP) telah muncul sebagai salah satu kategori polutan yang berkembang pesat, yang menimbulkan kekhawatiran signifikan baik dalam konteks lingkungan maupun kesehatan akibat efek toksikologinya.

Produksi plastik global pada tahun 2020 diperkirakan mencapai sekitar 367 juta metrik ton. Limbah plastik yang tidak dikelola dengan baik berpotensi menghasilkan partikel plastik berukuran sangat kecil, yaitu kurang dari 5 mm/ mikroplastik, yang kemudian tersebar ke lingkungan melalui angin maupun aliran air permukaan.³³

Mikroplastik secara umum diklasifikasikan menjadi dua jenis, yaitu mikroplastik primer dan mikroplastik sekunder.

Mikroplastik primer, seperti mikrobutiran pada produk kosmetik dan mikrofiber dari tekstil sintetis, merupakan partikel yang sengaja diproduksi dalam ukuran kecil untuk tujuan tertentu. Sebaliknya, mikroplastik sekunder terbentuk sebagai hasil dari degradasi dan fragmentasi plastik berukuran lebih besar akibat proses pelapukan di lingkungan. Keberadaan mikroplastik telah banyak dilaporkan di berbagai lingkungan perairan dan laut, dan partikel ini dapat tertelan oleh berbagai organisme akuatik, termasuk ikan, kerang, dan moluska bercangkang, yang pada akhirnya dapat menyebabkan proses bioakumulasi dan biomagnifikasi dalam rantai makanan. Meskipun dampak mikroplastik terhadap lingkungan dan organisme laut telah banyak diteliti, studi mengenai dampaknya pada manusia masih relatif terbatas, dengan karakteristik paparan dan efek yang dilaporkan menunjukkan variasi yang cukup besar.³⁴

A. DEFINISI

Istilah mikroplastik pertama kali diperkenalkan oleh Thompson pada tahun 2004 untuk menggambarkan akumulasi fragmen plastik berukuran sangat kecil yang terdeteksi secara mikroskopis pada sedimen laut di wilayah perairan Eropa.³⁵ Temuan tersebut menjadi salah satu awal perhatian ilmiah terhadap keberadaan partikel plastik berukuran mikro serta potensi dampaknya terhadap lingkungan dan kesehatan.³⁵

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) menyelenggarakan lokakarya internasional pertama di tahun 2008 mengenai mikroplastik di Washington, D.C., Amerika Serikat. Dalam pertemuan tersebut, dirumuskan suatu definisi operasional yang lebih luas mengenai mikroplastik, yaitu mencakup seluruh partikel plastik dengan ukuran lebih kecil dari 5 mm. Definisi ini kemudian menjadi acuan penting

dalam berbagai penelitian ilmiah terkait mikroplastik, karena memberikan batasan yang jelas dan seragam untuk kepentingan identifikasi, pengukuran, serta analisis dampak lingkungan. Namun demikian, sejumlah peneliti lain mengusulkan klasifikasi yang lebih rinci berdasarkan ukuran partikel plastik. Dalam klasifikasi tersebut, partikel dengan ukuran lebih dari 5 mm dikategorikan sebagai makroplastik, sedangkan mesoplastik berada pada rentang ukuran antara 5 mm hingga lebih dari 1 mm. Sementara itu, mikroplastik didefinisikan sebagai partikel dengan ukuran antara 1 mm hingga lebih besar dari 0,1 μm , dan nanoplastik merupakan partikel dengan ukuran sekitar 0,1 μm atau lebih kecil. Perbedaan klasifikasi ini mencerminkan berkembangnya pemahaman ilmiah terhadap variasi ukuran partikel plastik serta implikasinya terhadap perilaku, distribusi, dan potensi dampaknya di lingkungan maupun terhadap kesehatan organisme hidup.³⁶

Pada tahun 2009, Arthur dkk. mengusulkan batas ukuran maksimum dalam definisi mikroplastik sehingga istilah tersebut mulai digunakan untuk menggambarkan “partikel plastik berukuran kecil dengan diameter kurang dari 5 mm” (Gambar 1).³⁷ Seiring berkembangnya penelitian, definisi tersebut kemudian disempurnakan dengan pengelompokan mikroplastik berdasarkan asal terbentuknya, yaitu menjadi mikroplastik primer yang diproduksi dalam ukuran kecil sejak awal, dan mikroplastik sekunder yang terbentuk akibat degradasi atau fragmentasi plastik berukuran lebih besar.³⁷

Pada tahun 2015, *The Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection* GESAMP mendefinisikan mikroplastik sebagai partikel plastik berukuran kecil hingga 5 mm, termasuk partikel dengan skala nano sekitar 1 nanometer.³⁸ Definisi ini kemudian banyak digunakan dan menjadi acuan dalam berbagai penelitian di tingkat internasional. Selain dibedakan berdasarkan ukuran,

mikroplastik juga umumnya diklasifikasikan menurut bentuk fisiknya, seperti pelet, fragmen, dan serat, yang mencerminkan asal maupun proses degradasi partikel tersebut di lingkungan.³⁸



Gambar 1. Mikroplastik²⁸

Menurut Lambert et al., istilah “mikroplastik” merupakan suatu istilah payung yang mencakup berbagai variasi bentuk partikel, ukuran, serta jenis polimer. Oleh karena itu, sifat fisik dan kimia mikroplastik yang terdapat di lingkungan sangat beragam dan dapat berbeda secara signifikan dibandingkan dengan mikroplastik primer, seperti mikrobutiliran (microbeads), yang umumnya digunakan dalam pengujian ekotoksitas. Perbedaan ini menunjukkan bahwa mikroplastik di lingkungan nyata memiliki karakteristik yang lebih kompleks dan heterogen, sehingga berpotensi menimbulkan dampak yang berbeda pula terhadap organisme hidup dan ekosistem.³⁹

Mikroplastik merujuk pada partikel plastik berukuran sangat kecil yang berasal dari bahan plastik konvensional maupun polimer sintetis. Material penyusunnya mencakup berbagai jenis termoplastik, seperti polietilen, polipropilena, polistirena, *polyethylene terephthalate* (PET), polimetil

metakrilat, akrilik, serta kelompok bahan lain seperti resin, elastomer, *bio-based elastomer*, dan *polivinylsiloxane*. Partikel tersebut memiliki ukuran kurang dari 5 mm, termasuk kategori partikel berskala nano.¹ Seiring perkembangan penelitian, definisi mikroplastik terus mengalami penyempurnaan. Definisi terbaru mengusulkan bahwa mikroplastik merupakan partikel padat berbahan polimer sintetis atau matriks polimer, dengan bentuk yang dapat beraturan maupun tidak beraturan, berukuran antara 1 µm hingga 5 mm, bersifat primer ataupun sekunder berdasarkan asal terbentuknya, serta tidak larut dalam air.⁷

B. JENIS-JENIS MIKROPLASTIK

Mikroplastik dapat diklasifikasikan menjadi dua kelompok utama berdasarkan bentuk asalnya, yaitu mikroplastik primer dan mikroplastik sekunder. Mikroplastik primer merupakan partikel plastik berukuran sangat kecil yang sejak awal diproduksi dalam skala mikroskopis untuk berbagai keperluan industri dan komersial, atau terbentuk sebagai produk sampingan selama proses produksi. Partikel ini dimanfaatkan dalam berbagai aplikasi, seperti bahan abrasif, bahan baku pencetakan injeksi, serta partikel resin dalam manufaktur plastik. Selain itu, mikroplastik primer juga dapat berasal dari keausan produk plastik selama siklus hidupnya, misalnya abrasi ban kendaraan di jalan raya dan pelepasan serat sintetis dari tekstil selama proses pencucian. Bentuk umum mikroplastik primer meliputi mikrobutan (microbeads), mikrofiber (microfibers), dan pelet resin.^{35,37}

Mikrobutan merupakan partikel plastik berbentuk bulat dengan diameter umumnya kurang dari 5 mm, yang banyak ditemukan dalam produk perawatan pribadi seperti scrub eksfoliasi dan pasta gigi, dengan fungsi utama sebagai bahan

abrasif atau peningkat tekstur. Karena ukurannya yang kecil, mikrobutiran mudah masuk ke sistem perairan dan sering kali tidak tersaring dalam instalasi pengolahan air limbah.⁴⁰ Sementara itu, mikrofiber adalah serat plastik halus yang berasal dari tekstil sintetis, seperti pakaian, karpet, dan perabot rumah tangga, yang dapat terlepas selama proses produksi, penggunaan, pencucian, hingga pasca-pengolahan. Mikrofiber juga ditemukan pada berbagai produk lain seperti filter rokok, tisu basah, dan masker wajah.⁴⁰ Adapun pelet resin merupakan bahan baku utama industri plastik berbentuk butiran kecil yang berpotensi mencemari lingkungan, terutama ekosistem perairan, apabila terjadi tumpahan atau pelepasan selama proses produksi, transportasi, maupun pengolahan. Secara keseluruhan, mikroplastik primer memiliki kemampuan untuk mengadsorpsi dan mentransportasikan berbagai bahan kimia berbahaya, seperti logam berat dan senyawa organik persisten, sehingga meningkatkan dampak ekologisnya.⁴¹

Di sisi lain, mikroplastik sekunder terbentuk secara tidak langsung melalui proses degradasi plastik berukuran lebih besar akibat paparan berbagai faktor lingkungan. Proses ini meliputi radiasi ultraviolet, perubahan suhu, reaksi oksidasi, aktivitas mikroorganisme, serta gaya mekanik seperti gesekan dan abrasi yang menyebabkan fragmentasi plastik menjadi partikel berukuran mikro. Sumber mikroplastik sekunder sangat beragam, antara lain berasal dari limbah rumah tangga seperti kantong plastik dan botol sekali pakai, peralatan plastik, jaring dan tali nelayan, hingga serat sintetis dari tekstil, serta degradasi ban kendaraan yang menjadi kontributor signifikan di lingkungan.^{35,37}

Karakteristik mikroplastik yang berukuran kecil, memiliki luas permukaan besar, dan bersifat hidrofobik memungkinkan partikel ini mengadsorpsi berbagai zat berbahaya, termasuk logam berat, senyawa organik persisten, dan mikroorganisme

patogen. Hal ini menjadikan mikroplastik sebagai vektor pembawa kontaminan di lingkungan. Selain itu, ukurannya yang sangat kecil memudahkan mikroplastik masuk ke dalam rantai makanan melalui organisme akuatik maupun terestrial, yang kemudian dapat mengalami bioakumulasi dan biomagnifikasi pada tingkat trofik yang lebih tinggi. Kondisi ini menimbulkan kekhawatiran serius terhadap dampak jangka panjang bagi kesehatan manusia, termasuk potensi efek toksik, inflamasi, gangguan endokrin, hingga risiko penyakit kronis.^{35,37}

Dengan demikian, baik mikroplastik primer maupun sekunder berkontribusi signifikan terhadap pencemaran lingkungan global. Peningkatan produksi plastik yang tidak diimbangi dengan pengelolaan limbah yang optimal serta rendahnya tingkat daur ulang memperparah akumulasi mikroplastik di berbagai kompartemen lingkungan, seperti tanah, air, dan udara. Oleh karena itu, pemahaman yang komprehensif mengenai sumber, karakteristik, dan dampak mikroplastik sangat diperlukan sebagai dasar dalam merumuskan strategi mitigasi dan pengelolaan pencemaran plastik yang lebih efektif dan berkelanjutan.

C. MIKROPLASTIK DALAM KEDOKTERAN GIGI

Plastik digunakan secara luas dalam bidang kedokteran gigi karena daya tahannya, nilai estetik, serta kemudahan dalam proses fabrikasi. Berbagai material dental yang umum digunakan, seperti resin akrilik, polikarbonat, dan senyawa berbasis poliuretan, sering diaplikasikan pada berbagai alat, termasuk retainer, pelindung mulut (*mouthguard*), serta prostesis lepasan. Retainer *vacuum-formed* dan perangkat ortodontik sejenis umumnya dibuat menggunakan lembaran termoplastik seperti polyethylene terephthalate glycol (PETG)

atau polipropilena, yang dipanaskan dan kemudian dicetak mengikuti bentuk lengkung gigi secara presisi.⁴²

Selain itu, *aligner* ortodontik yang kini menjadi alternatif populer dibandingkan alat ortodontik cekat juga tersusun atas polimer termoplastik canggih. Perangkat ini dirancang untuk digunakan hampir sepanjang waktu dan biasanya diganti setiap 1 hingga 2 minggu. Meskipun komposisi kimianya dapat sedikit berbeda antar merek, komponen utamanya umumnya terdiri atas bahan berbasis poliuretan atau kopolimer berlapis (*multilayer copolymers*).⁴²

Ketergantungan bidang kedokteran gigi terhadap bahan restoratif berbasis resin, prostetik polimer, serta plastik sekali pakai menyebabkan sebagian material tersebut pada akhirnya terdegradasi menjadi partikel mikroskopis. Perkiraan terbaru bahkan memperingatkan bahwa pada tahun 2050 jumlah mikroplastik di lautan dapat melebihi jumlah ikan. Dalam konteks ini, aktivitas pelayanan kesehatan—termasuk kedokteran gigi—mulai mendapat perhatian khusus terkait kontribusinya terhadap jejak plastik (*plastic footprint*) di lingkungan.⁴³

Menjaga kelestarian dan kesehatan lingkungan merupakan tanggung jawab setiap makhluk hidup, termasuk dalam pelaksanaan pelayanan kesehatan. Pada bidang kesehatan, telah tersedia berbagai pedoman pengendalian infeksi yang diterapkan dalam praktik sehari-hari, salah satunya melalui pengelolaan limbah atau analisis mengenai dampak lingkungan (AMDAL), yang menjadi bagian dari persyaratan bagi dokter gigi dalam proses resertifikasi untuk memperpanjang izin praktik.⁴⁴ Dokter gigi maupun tenaga kesehatan lainnya dituntut untuk mematuhi ketentuan tersebut, termasuk melakukan pemisahan limbah medis berdasarkan kategori infeksius dan noninfeksius serta menerapkan prosedur penanganan limbah sesuai standar yang berlaku. Meskipun

demikian, hingga saat ini belum terdapat regulasi yang secara khusus mengatur pengelolaan limbah plastik yang berasal dari praktik kedokteran gigi, sehingga aspek manajemen material berbasis plastik masih menjadi perhatian yang perlu dikembangkan lebih lanjut.⁴⁴

Partikel plastik dalam bidang kedokteran gigi berasal dari berbagai sumber yang luas, yang secara umum dapat diklasifikasikan menjadi mikroplastik primer (partikel berukuran mikro yang diproduksi secara sengaja) dan mikroplastik sekunder (partikel yang terbentuk akibat degradasi atau keausan material plastik berukuran lebih besar).⁴⁵ Dalam praktik kedokteran gigi, kedua jenis mikroplastik ini dapat dihasilkan melalui berbagai aktivitas klinis maupun non-klinis.

1. MATERIAL RESTORATIF DAN PROSTETIK

Material berbasis resin seperti komposit, sealant, dan polimer gigi tiruan dapat melepaskan partikel mikroskopis selama proses penempatan, finishing, maupun akibat keausan rutin. Dalam simulasi klinis, proses penggerindaan atau pemolesan restorasi komposit menghasilkan partikel mikro dalam jumlah besar dengan ukuran median sekitar 5–10 μm . Partikel ini memiliki luas permukaan yang sangat tinggi ($\sim 10^3 \text{ m}^2/\text{kg}$), sehingga dapat meningkatkan pelepasan monomer yang tidak bereaksi maupun bahan aditif lainnya.⁴⁶

Studi terbaru juga menunjukkan bahwa prosedur klinis sehari-hari, seperti pelepasan restorasi komposit lama (mikroplastik sekunder), dapat menghasilkan debu plastik berukuran 20–100 μm yang menyebar dan mengendap di berbagai permukaan ruang praktik. Selain itu, degradasi pasif juga berperan, di mana prostesis berbasis polimer, seperti gigi tiruan akrilik, dapat melepaskan partikel kecil

selama simulasi pengunyahan dan pembersihan, meskipun dalam jumlah relatif kecil per hari. Namun, dalam penggunaan jangka panjang, partikel ini dapat terakumulasi di rongga mulut atau saluran pencernaan. Dengan demikian, pasien dengan penggunaan gigi tiruan jangka panjang atau restorasi komposit luas berpotensi mengalami paparan kronis, meskipun signifikansi klinisnya masih belum sepenuhnya dipahami karena keterbatasan data *in vivo* jangka panjang.⁴⁷

Material non-polimer seperti zirkonia, keramik, dan amalgam juga perlu diperhatikan. Meskipun tidak melepaskan mikroplastik dalam arti yang sama dengan material berbasis resin, proses pengolahan dan manipulasi klinisnya tetap dapat menghasilkan partikel. Sebagai contoh, proses CAD/CAM pada zirkonia dan keramik litium disilikat menghasilkan partikel mikro hingga nano yang dapat tersebar di udara maupun limbah cair laboratorium. Selain itu, proses penggerindaan dan pemolesan di kursi perawatan dapat menghasilkan debu keramik yang dapat terhirup oleh tenaga medis jika tidak dikendalikan dengan baik.⁴⁸

2. PERALATAN ORTODONTIK

Clear aligner berbahan termoplastik menjadi perhatian sebagai salah satu sumber mikroplastik. Studi *in vitro* menunjukkan bahwa penggunaan aligner dalam saliva buatan dengan simulasi tekanan mekanik selama 1–2 minggu dapat menyebabkan pelepasan fragmen polimer berukuran sekitar 5–20 µm. Analisis spektroskopi Raman mengidentifikasi bahwa partikel tersebut berasal dari bahan aligner itu sendiri, seperti polyethylene terephthalate atau poliuretan.⁴⁹

Selain itu, resin adhesif ortodontik juga berpotensi menghasilkan mikroplastik. Proses pelepasan braket

(*debonding*) diketahui menghasilkan partikel yang memiliki aktivitas estrogenik secara *in vitro*, kemungkinan akibat kandungan monomer turunan Bisphenol-A. Temuan ini menimbulkan kekhawatiran bahwa prosedur ortodontik rutin dapat menyebabkan paparan zat pengganggu endokrin, terutama pada pasien remaja.⁵⁰

Retainer *vacuum-formed* dan perangkat ortodontik sejenis umumnya dibuat menggunakan lembaran termoplastik seperti polyethylene terephthalate glycol (PETG) atau polipropilena, yang dipanaskan dan kemudian dicetak untuk menyesuaikan bentuk lengkung gigi secara presisi.⁵¹

Selain itu, *aligner* ortodontik yang kini menjadi alternatif populer dibandingkan alat ortodontik cekat juga tersusun atas polimer termoplastik canggih. Perangkat ini dirancang untuk digunakan hampir sepanjang waktu dan biasanya diganti setiap 1 hingga 2 minggu. Meskipun komposisi kimianya dapat sedikit berbeda antar merek, komponen utamanya umumnya terdiri atas bahan berbasis poliuretan atau kopolimer berlapis (*multilayer copolymers*).

⁵¹

Meskipun memberikan berbagai manfaat klinis, penggunaan material plastik dalam kedokteran gigi menimbulkan kekhawatiran terkait potensi pelepasan komponen plastik, termasuk mikroplastik (MP) dan nanoplastik (NP), atau secara kolektif disebut sebagai mikro- dan nanoplastik (MNP), selama penggunaan intraoral jangka panjang.⁵¹

3. PRODUK PREVENTIF DAN KEBERSIHAN MULUT

Beberapa produk pasta gigi dan bahan pemoles sebelumnya mengandung mikrobutiliran plastik (umumnya berbahan polietilena) sebagai bahan abrasif. Meskipun

penggunaannya mulai dibatasi di berbagai negara, produk lama dan beberapa kosmetik masih berkontribusi terhadap mikroplastik primer. Mikrobutiran berukuran <1 mm digunakan untuk meningkatkan efek pemolesan dan pemutihan, dengan konsentrasi dilaporkan mencapai sekitar 1–2% dari berat produk.⁵²

Partikel ini akan terbang ke sistem air limbah saat menyikat gigi dan sering kali tidak tersaring secara efektif, sehingga berakhir di lingkungan perairan. Produk lain seperti obat kumur, sikat gigi, dan benang gigi juga berpotensi menjadi sumber mikroplastik. Keausan bulu sikat dapat melepaskan fragmen nilon mikroskopis, sementara benang gigi dapat terfragmentasi menjadi serat kecil selama penggunaan. Meskipun data kuantitatif masih terbatas, jumlah besar produk perawatan gigi plastik yang digunakan setiap tahun menunjukkan kontribusi signifikan terhadap pembentukan mikroplastik sekunder.⁵³

4. PERLENGKAPAN DAN PERALATAN KLINIS

Penggunaan plastik sekali pakai dalam praktik kedokteran gigi, seperti sarung tangan, ujung suction, dan alat pelindung diri, berkontribusi terhadap pencemaran mikroplastik setelah dibuang dan mengalami degradasi. Penggunaan alat pelindung diri meningkat tajam selama pandemi COVID-19, yang sebagian besar terbuat dari polimer seperti polipropilena dan nitril.⁵⁴

Meskipun pelepasan mikroplastik dari limbah ini umumnya terjadi di lingkungan eksternal, terdapat potensi pelepasan di dalam ruangan, misalnya dari masker yang melepaskan mikrofiber akibat gesekan. Studi terbaru menunjukkan adanya deposisi mikroplastik pada permukaan dalam klinik gigi, yang menunjukkan pentingnya

ventilasi yang baik serta pengelolaan penggunaan plastik secara bijak.⁵⁵

5. JALUR PENGELOLAAN LIMBAH

Pengelolaan limbah plastik dari praktik kedokteran gigi juga berkontribusi terhadap pembentukan mikroplastik. Pembuangan atau daur ulang yang tidak tepat dapat menyebabkan degradasi plastik menjadi partikel mikro di lingkungan. Aktivitas laboratorium gigi, seperti penggerindaan akrilik atau pemrosesan CAD/CAM, dapat menghasilkan partikel plastik yang berpotensi masuk ke sistem air limbah jika tidak ditangani dengan baik. Studi di rumah sakit gigi menunjukkan adanya kontaminasi mikroplastik pada debu dan limbah cair klinik, yang berasal dari berbagai sumber seperti pakaian kerja, apron pasien, serta sisa bahan akrilik. Hal ini menunjukkan bahwa limbah plastik dari bidang kedokteran gigi, yang sebelumnya tidak dianggap sebagai sumber utama pencemaran, kini menjadi kontributor penting terhadap kontaminasi mikroplastik di lingkungan.⁵⁶

Berbagai material yang digunakan dalam praktik kedokteran gigi tersusun dari komponen berbasis plastik dan berpotensi berkontak langsung dengan jaringan terbuka maupun cairan tubuh, sehingga memerlukan pengelolaan serta penggunaan yang tepat untuk meminimalkan risiko terhadap kesehatan dan lingkungan. Beberapa bahan kedokteran gigi yang mengandung plastik antara lain material berbasis resin untuk restorasi atau penambalan gigi, *fissure sealant*, gigi tiruan berbahan resin akrilik, plat ortodontik, serta bahan abrasif yang digunakan dalam prosedur pemolesan gigi.^{7,35,36} Penggunaan material tersebut secara luas menunjukkan bahwa praktik

kedokteran gigi memiliki ketergantungan yang cukup tinggi terhadap bahan berbasis polimer sintesis.⁷

Komponen dari bahan kedokteran gigi berpotensi terlepas ke lingkungan kerja maupun ke rongga mulut selama proses penggunaan material berlangsung. Pelepasan tersebut dapat terjadi pada berbagai tahapan prosedur, seperti saat pembentukan bahan, *finishing*, *polishing*, hingga proses pembuangan atau pembongkaran material dari permukaan gigi. Partikel maupun mikropartikel yang berasal dari bahan kedokteran gigi dilaporkan dapat mengandung monomer yang terlepas dari material tersebut.⁵⁷ Seiring meningkatnya perhatian terhadap pencemaran mikroplastik, keberadaan partikel hasil degradasi bahan kedokteran gigi menjadi isu yang semakin penting untuk dikaji. Pada penggunaan resin komposit sebagai bahan restorasi gigi, monomer yang tidak mengalami polimerisasi sempurna dapat terlepas ke rongga mulut dan setelah periode tertentu partikel tersebut berpotensi terdeteksi dalam jumlah tertentu.⁵⁸ Beberapa penelitian menunjukkan bahwa monomer hasil pelepasan tersebut dapat ditemukan pada saliva maupun urin, yang mengindikasikan kemungkinan terjadinya absorpsi ke dalam tubuh.⁵⁸ Partikel atau komponen resin komposit dapat memasuki tubuh melalui berbagai jalur, di antaranya penyerapan melalui mukosa rongga mulut, difusi menuju pulpa melalui tubulus dentin, absorpsi melalui sistem pernapasan, tertelan melalui saluran cerna, maupun paparan dari komponen yang terlepas di sepanjang sistem pencernaan.⁵⁹

Sebuah kajian melaporkan bahwa bahan restorasi gigi dapat mengalami keausan dengan rata-rata sekitar 62–106 mikrometer setiap tahun selama masa penggunaan. Pada tahun kedua, tingkat keausan dilaporkan mencapai sekitar 125 mikrometer, sedangkan pada tahun keempat diperkirakan meningkat hingga 125–243 mikrometer.⁶⁰ Besarnya keausan cenderung bertambah seiring meningkatnya ukuran restorasi

yang digunakan. Selain itu, kondisi fungsional rongga mulut seperti gaya mastikasi yang berlebihan atau tidak normal, termasuk *bruxism* dan *clenching*, juga diketahui dapat mempercepat proses kerusakan material restorasi.⁶⁰ Setelah diaplikasikan di rongga mulut, resin komposit berpotensi mengalami degradasi polimer yang dapat meningkatkan pelepasan komponen material ke lingkungan oral. Proses pelepasan tersebut dipengaruhi oleh berbagai faktor, antara lain interaksi dengan saliva, tekanan mastikasi, perubahan suhu, perubahan kondisi kimia selama konsumsi makanan dan minuman, serta aktivitas mikroorganisme yang terdapat di dalam rongga mulut.^{59,62,63} Kondisi ini menunjukkan bahwa paparan lingkungan oral secara terus-menerus dapat memengaruhi stabilitas dan ketahanan bahan restorasi berbasis resin dalam jangka panjang.

1. KOMPONEN SALIVA

Komponen utama saliva adalah air, resin komposit merupakan material polar, molekul air dapat dengan mudah masuk ke dalam polimernya dan berdifusi ke dalam monomer yang tidak terpolimerisasi. Polimer terdegradasi dalam keadaan berair melalui 2 mekanisme, yaitu melalui hidrolisis secara pasif dan reaksi enzimatik.^{62,63}

2. GAYA MASTIKASI

Saliva yang sebagian besar tersusun atas air dapat berperan dalam proses degradasi material resin komposit di rongga mulut. Resin komposit memiliki sifat polar sehingga molekul air relatif mudah menembus struktur polimernya dan berdifusi menuju monomer yang belum mengalami polimerisasi sempurna.^{62,63} Masuknya air ke dalam material tersebut dapat memicu terjadinya degradasi polimer melalui

dua mekanisme utama, yaitu hidrolisis pasif yang berlangsung secara alami serta proses degradasi yang dipengaruhi oleh reaksi enzimatik.^{62,63} Kedua mekanisme tersebut berpotensi menyebabkan penurunan stabilitas material dan meningkatkan pelepasan komponen penyusun resin seiring lamanya penggunaan di rongga mulut.

3. PERUBAHAN SUHU

Aktivitas makan dan minum yang dilakukan setiap hari dapat menyebabkan fluktuasi suhu di dalam rongga mulut. Perubahan suhu yang terjadi secara berulang tersebut berpotensi menciptakan kondisi yang kurang menguntungkan bagi ketahanan material kedokteran gigi. Perbedaan koefisien ekspansi termal antara bahan kedokteran gigi dan jaringan gigi dapat memicu terbentuknya tekanan pada permukaan (*surface stress*), yang pada akhirnya mempercepat proses degradasi material.⁶⁵ Kondisi ini dapat menurunkan stabilitas bahan serta memengaruhi daya tahan restorasi atau material kedokteran gigi selama masa penggunaannya di rongga mulut.⁶⁵

Suhu normal rongga mulut berada pada kisaran rata-rata 36°C, dengan kemampuan adaptasi terhadap perubahan suhu hingga sekitar 50°C sebagai batas atas dan 5°C sebagai batas bawah.⁸ Fluktuasi suhu tersebut dapat memengaruhi kondisi jaringan keras gigi maupun material kedokteran gigi yang berada di dalam rongga mulut. Gigi secara alami dapat mengalami berbagai bentuk keausan, seperti abrasi yang dipicu oleh gaya mekanis misalnya saat mengunyah atau menyikat gigi, atrisi akibat kontak langsung antargigi rahang atas dan bawah, abfraksi yang terjadi karena tekanan pada area *cemento-enamel junction* hingga menimbulkan fraktur mikro, serta erosi yang disebabkan oleh paparan bahan kimia.^{16,66} Selain memengaruhi jaringan gigi, proses

keausan juga dapat terjadi pada bahan kedokteran gigi. Tingkat kerusakan material dipengaruhi oleh karakteristik permukaan bahan, kondisi lingkungan rongga mulut seperti perubahan suhu, serta interaksi material dengan faktor biologis dan mekanis di sekitarnya.^{16,66}

Berdasarkan standar *ISO/TS 11405:2015*, simulasi perubahan suhu rongga mulut terhadap bahan kedokteran gigi dapat dilakukan menggunakan metode *thermal cycling* sebanyak 500 siklus dengan rentang suhu antara 5°C hingga 55°C. Akan tetapi, jumlah 500 siklus dinilai masih terlalu rendah untuk menggambarkan paparan suhu dalam jangka waktu yang lebih representatif terhadap kondisi klinis sebenarnya.⁴⁷ Oleh karena itu, dikembangkan pendekatan lain untuk mengevaluasi pengaruh perubahan temperatur terhadap ketahanan bahan kedokteran gigi. Salah satu metode yang dianggap lebih efektif adalah pemberian *thermal cycling* pada suhu 5°C–55°C selama 1 menit per siklus dalam periode empat hari, atau dengan merendam sampel secara langsung dalam air bersuhu 55°C selama empat hari.⁶⁸ Pendekatan tersebut digunakan untuk mensimulasikan efek fluktuasi suhu rongga mulut secara lebih intensif terhadap stabilitas dan degradasi material kedokteran gigi.^{47,68}

4. PERUBAHAN KONDISI KIMIA PADA SAAT MAKAN

Konsumsi makanan dan minuman sehari-hari dapat memberikan pengaruh langsung terhadap bahan kedokteran gigi, baik melalui kontak langsung dengan material maupun melalui perubahan kondisi pH di dalam rongga mulut. Perubahan tersebut berpotensi mempercepat proses keausan pada jaringan gigi maupun bahan kedokteran gigi

yang digunakan.^{60,69} Paparan berulang terhadap variasi pH, terutama kondisi yang lebih asam, dapat memengaruhi stabilitas permukaan material sehingga meningkatkan risiko degradasi dan menurunkan ketahanan bahan dalam jangka panjang.^{60,69}

Saliva pada kondisi normal umumnya memiliki pH sekitar 7 dan berperan penting sebagai sistem penyangga (*buffer*) yang membantu menetralkan suasana asam di rongga mulut setelah paparan makanan atau minuman dengan tingkat keasaman tinggi.⁷⁰ Kemampuan tersebut berkontribusi dalam menjaga keseimbangan lingkungan oral agar tetap stabil. Untuk mensimulasikan perubahan pH rongga mulut pada penelitian laboratorium, salah satu metode yang sering digunakan adalah *pH cycling*, yaitu prosedur yang dirancang untuk mereplikasi kondisi fluktuasi keasaman di dalam rongga mulut. Rentang pH normal rongga mulut berkisar antara 6,2–7,6, sehingga metode ini dianggap sesuai untuk menggambarkan paparan asam dan netral yang terjadi secara berulang.⁷¹ Proses *pH cycling* dilakukan dengan merendam sampel pada larutan asam dan larutan netral pada suhu 37°C. Kondisi asam umumnya disimulasikan menggunakan larutan 74 mM *acetate buffer* dengan pH 4,3 yang mengandung kalsium dan fosfat, sedangkan kondisi netral direpresentasikan menggunakan 20 mM *TRIS buffer* dengan pH 7,4 yang mengandung kalsium, fosfat, dan KCl.⁷² Setiap siklus berlangsung selama 6 jam pada kondisi asam dan 18 jam pada kondisi netral, kemudian diulang secara berturut-turut selama 10 hari untuk menggambarkan perubahan pH yang terjadi dalam lingkungan rongga mulut.⁷²

5. MIKROORGANISME DALAM RONGGA MULUT

Mikroorganisme yang terdapat di dalam rongga mulut memiliki potensi untuk berinteraksi dengan polimer penyusun bahan kedokteran gigi, meskipun informasi mengenai mekanisme dan dampak interaksi tersebut masih terbatas. Pada studi *in vitro*, bakteri dilaporkan mampu berkolonisasi pada permukaan resin komposit dan menyebabkan peningkatan kekasaran permukaan material setelah periode inkubasi tertentu. Kondisi tersebut mengindikasikan adanya kemungkinan degradasi pada permukaan resin komposit seiring waktu.⁷⁵ Proses degradasi ini diduga berkaitan dengan produksi asam oleh bakteri, yang dapat memengaruhi stabilitas material restorasi dan mempercepat kerusakan permukaannya.⁷⁵ Dengan demikian, aktivitas mikroorganisme di rongga mulut berpotensi menjadi salah satu faktor yang memengaruhi ketahanan bahan kedokteran gigi selama penggunaan jangka panjang.⁷⁵

Secara umum, degradasi polimer pada bahan kedokteran gigi tidak disebabkan oleh satu faktor tunggal, melainkan merupakan hasil interaksi berbagai kondisi di rongga mulut yang saling memengaruhi. Air yang terkandung dalam saliva, tekanan mastikasi, serta perubahan suhu dapat bekerja secara bersamaan dan mempercepat proses degradasi material kedokteran gigi.²⁶ Seluruh bahan kedokteran gigi pada dasarnya berpotensi melepaskan substansi tertentu ke lingkungan rongga mulut maupun lingkungan kerja, meskipun jumlah dan tingkat pelepasannya berbeda-beda tergantung karakteristik material yang digunakan.⁵² Pelepasan komponen tersebut dapat menimbulkan respons biologis, baik yang bersifat lokal pada area kontak maupun sistemik setelah substansi terserap ke dalam tubuh. Sel-sel rongga mulut manusia (*human oral cells*) menjadi jaringan pertama yang terpapar bahan kedokteran gigi,

sehingga berpotensi menerima dampak langsung dari komponen yang dilepaskan material tersebut. Beberapa penelitian mengasumsikan bahwa bahan kedokteran gigi tertentu memiliki kemungkinan menimbulkan efek genotoksik terhadap manusia, sehingga aspek biokompatibilitas dan keamanan jangka panjang material menjadi perhatian penting dalam praktik kedokteran gigi.^{65,66}

Selain faktor biologis dan lingkungan rongga mulut, aktivitas penyikatan gigi juga berperan dalam mempercepat proses degradasi polimer pada bahan kedokteran gigi. Gesekan yang terjadi selama penyikatan berpotensi menyebabkan keausan serta hilangnya sebagian struktur permukaan gigi maupun material restorasi. Keausan akibat menyikat gigi merupakan fenomena yang umum terjadi karena adanya tekanan mekanis yang berlangsung secara berulang.⁶⁶ Untuk meneliti pengaruh tersebut dalam kondisi laboratorium, digunakan alat simulasi penyikatan yang dirancang menyerupai pola penyikatan gigi sehari-hari. Alat ini berfungsi untuk memberikan paparan mekanis pada sampel uji sehingga kondisi permukaan material dapat merepresentasikan efek penggunaan jangka panjang di rongga mulut. Oleh karena itu, simulasi penyikatan banyak dimanfaatkan dalam penelitian untuk mengevaluasi ketahanan, tingkat keausan, maupun degradasi bahan kedokteran gigi terhadap aktivitas mekanis rutin.⁶⁶

Bizhang dkk. melaporkan bahwa rata-rata durasi menyikat gigi pada manusia berlangsung sekitar dua menit, dengan waktu kontak maksimal sekitar lima detik untuk setiap permukaan gigi.⁶⁷ Sementara itu, penelitian oleh Wiegand dkk. pada tahun 2017 menunjukkan bahwa gaya yang umum digunakan saat menyikat gigi secara manual berkisar $1,6 \pm 0,3$ N.⁶⁸ Temuan lain dari Wang dkk. menyebutkan bahwa beban sebesar 200 gram dapat digunakan untuk mensimulasikan tekanan penyikatan gigi yang menyerupai kebiasaan manusia

pada umumnya.⁶⁹ Dalam penelitian laboratorium, aktivitas penyikatan sebanyak 100.000 *stroke* diperkirakan setara dengan sekitar 4,2 tahun penyikatan gigi sehari-hari. Selain itu, penggantian sikat gigi pada simulasi dianjurkan setiap 50.000 *stroke* untuk mempertahankan konsistensi efek abrasi yang dihasilkan.⁶⁹ Berdasarkan akumulasi durasi paparan penyikatan pada permukaan tertentu, total waktu penyikatan selama 260 menit diperkirakan dapat merepresentasikan sekitar 8,5 tahun aktivitas menyikat gigi dalam kondisi normal.⁶⁷ Temuan-temuan tersebut menjadi dasar dalam pengembangan metode simulasi penyikatan untuk mengevaluasi ketahanan dan degradasi bahan kedokteran gigi terhadap paparan mekanis jangka panjang.^{67,69}

Meskipun memberikan berbagai keuntungan klinis, penggunaan material plastik dalam kedokteran gigi menimbulkan kekhawatiran terkait potensi pelepasan komponen plastik, termasuk mikroplastik (MP) dan nanoplastik (NP) atau yang secara kolektif dikenal sebagai mikro- dan nanoplastik (MNP), selama penggunaan intraoral jangka panjang. Pelepasan ini berpotensi berkontribusi terhadap paparan internal serta menimbulkan implikasi terhadap kesehatan pasien.⁴⁰

D. EFEK MIKROPLASTIK TERHADAP KESEHATAN MANUSIA

Mikroplastik mudah tertelan karena ukurannya yang sangat kecil. Partikel ini juga dapat dengan mudah berpindah melalui rantai makanan serta bertahan lama di lingkungan karena sifatnya yang resisten terhadap biodegradasi. Selain itu, karena mikroplastik berada pada skala mikro hingga nano, partikel ini hampir tidak mungkin dihilangkan setelah dilepaskan ke lingkungan. Berdasarkan karakteristik tersebut,

mikroplastik menimbulkan potensi bahaya bagi manusia dan lingkungan. Sebagai contoh representatif, mikroplastik dapat menyebabkan kerusakan fisik dan mekanis pada organisme laut ketika tertelan secara tidak sengaja, seperti menimbulkan kelainan pada organ internal. Efek ekotoksitas tidak hanya disebabkan oleh polimer itu sendiri, tetapi juga oleh monomer yang tidak bereaksi, pengotor seperti sisa katalis atau produk samping reaksi, bahan aditif seperti penstabil, serta zat lain dalam matriks polimer seperti pewarna, pelumas, dan plastisizer. Selain itu, mikroplastik dapat masuk ke dalam tubuh manusia ketika tidak tersaring secara efektif dalam proses pengolahan air limbah, atau melalui aliran yang bermuara ke laut, sehingga meningkatkan risiko terhadap ekosistem dan kesehatan manusia.⁶⁸

Rute utama paparan mikroplastik dalam kedokteran gigi adalah melalui ingesti dan inhalasi. Pasien dapat menelan mikroplastik yang terlepas dari material dental di rongga mulut, sedangkan tenaga kesehatan gigi berpotensi menghirup debu yang mengandung mikroplastik selama prosedur klinis. Ingesti pada pasien dapat terjadi melalui penggunaan *aligner* ortodontik, gigi tiruan, serta restorasi berbasis resin. Sebagai contoh, pasien yang menggunakan *clear aligner* secara terus-menerus dapat menelan saliva yang mengandung fragmen mikroplastik hasil abrasi dari alat tersebut. Demikian pula, debris mikroskopis dari restorasi komposit yang baru dipoles dapat bercampur dengan saliva dan tertelan. Dalam jangka panjang, pelepasan partikel dalam jumlah kecil dari gigi tiruan berbasis polymethyl methacrylate (PMMA) atau bahan sealant juga berpotensi berkontribusi terhadap paparan oral.⁴⁷

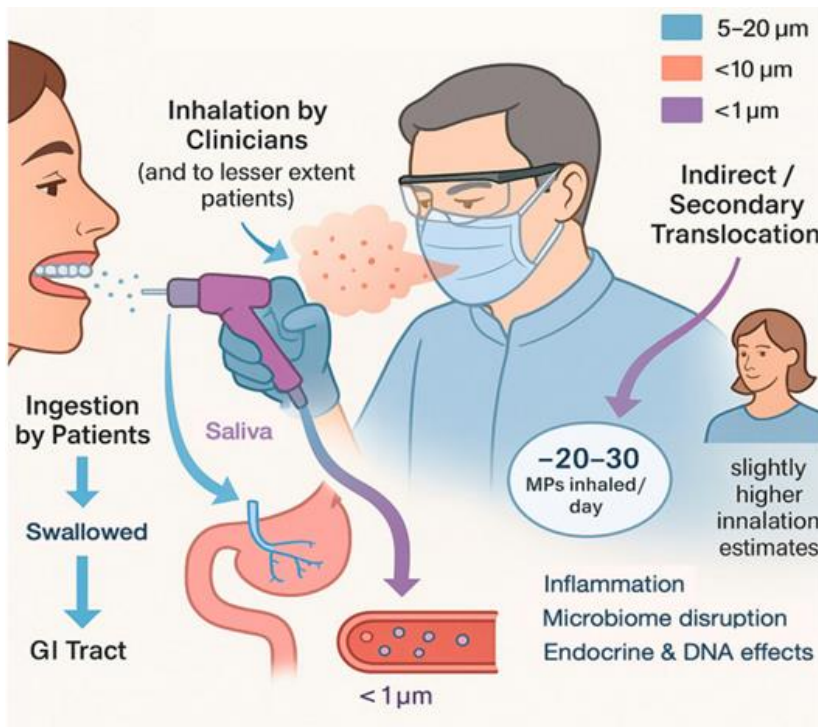
Setelah tertelan, sebagian partikel akan melewati saluran pencernaan dan dieliminasi, namun sejumlah studi menunjukkan bahwa sebagian lainnya dapat diserap oleh tubuh dan berpotensi menimbulkan berbagai gangguan, seperti

inflamasi jaringan, perubahan mikrobiota usus, gangguan sistem endokrin, serta kerusakan DNA [2,56–58]. Partikel mikroplastik berukuran sekitar 20 μm atau lebih besar cenderung hanya melewati saluran cerna secara sementara, sedangkan partikel berukuran nano ($<1\ \mu\text{m}$) memiliki potensi untuk menembus membran sel dan masuk ke dalam aliran darah.⁵⁰

Di sisi lain, inhalasi mikroplastik menjadi perhatian khusus bagi tenaga medis gigi maupun pasien, terutama selama prosedur yang menghasilkan aerosol, seperti penggunaan *high-speed handpiece*, penggerindaan akrilik, atau pemolesan material polimer. Debu yang dihasilkan dari proses ini mengandung partikel mikroplastik dengan ukuran respirabel ($<10\ \mu\text{m}$). Suatu studi paparan di klinik gigi melaporkan bahwa rata-rata individu dapat menghirup sekitar 20–30 partikel mikroplastik per hari dalam lingkungan praktik yang sibuk. Partikel tersebut sebagian besar terdiri dari polyethylene terephthalate (PET) dan polimer umum lainnya yang ditemukan mengendap di permukaan dan kemungkinan juga tersebar di udara.⁴¹

Jalur paparan lain yang lebih subtil adalah melalui translokasi melalui mukosa. Nanoplastik berpotensi menembus membran mukosa oral atau masuk melalui tubulus dentin yang terbuka selama prosedur perawatan gigi, meskipun bukti langsung mengenai hal ini masih terbatas. Mengingat bahwa nanopartikel secara sengaja digunakan dalam beberapa material kedokteran gigi, seperti *nanofiller* pada komposit, tidak dapat dikesampingkan kemungkinan bahwa produk samping berupa nanoplastik dapat berinteraksi pada tingkat jaringan apabila terlepas. Secara keseluruhan, tingkat paparan aktual dalam praktik kedokteran gigi masih sulit untuk diukur secara presisi, namun keberadaan mikroplastik dan nanoplastik di lingkungan klinis telah terdokumentasi. Meskipun kontribusi dari sumber kedokteran gigi mungkin relatif lebih kecil

dibandingkan paparan dari makanan atau air, jalur ini tetap penting karena merupakan paparan langsung pada area yang rentan, yaitu rongga mulut, sehingga memerlukan perhatian khusus (Gambar 2).⁴¹



Gambar 2. Jalur masuk mikroplastik⁴¹

Menariknya, studi tersebut juga menunjukkan bahwa tenaga medis perempuan memiliki estimasi paparan inhalasi yang sedikit lebih tinggi, yang diduga berkaitan dengan perbedaan posisi kerja atau penggunaan produk kosmetik yang dapat menarik serat mikroplastik. Partikel mikroplastik yang terhirup dapat terdeposit di saluran pernapasan; partikel berukuran lebih besar umumnya akan dieliminasi melalui mekanisme mukosilier dan akhirnya tertelan, sementara

partikel yang lebih kecil dapat menetap di paru-paru dan berpotensi menimbulkan dampak kesehatan jangka panjang.⁶⁹

Setelah memasuki rongga mulut, mikroplastik dapat berinteraksi dengan jaringan gingiva, di mana efek mekanik dan kimianya berpotensi berkontribusi terhadap terjadinya penyakit periodontal. Mikroplastik dapat memasuki jaringan periodonsium melalui beberapa mekanisme, termasuk difusi pasif, pengambilan oleh sel (*cellular uptake*), serta kontak langsung antara partikel mikroplastik dengan sel epitel gingiva. Partikel mikroplastik berukuran lebih kecil, khususnya yang berdiameter kurang dari 1 μm , dapat berdifusi secara pasif melalui membran sel atau difagositosis oleh sel imun seperti makrofag dan neutrofil. Sel-sel imun ini umumnya direkrut ke lokasi infeksi atau inflamasi dan dapat memfagositosis mikroplastik sebagai bagian dari respons terhadap partikel asing.⁷⁰

Setelah masuk ke dalam sel, mikroplastik dapat menyebabkan stres seluler, menginisiasi jalur inflamasi, serta mengganggu fungsi seluler. Selain itu, mikroplastik juga dapat masuk ke dalam sel epitel gingiva dan menyebabkan kerusakan langsung, sekaligus mengaktifkan berbagai respons stres seluler, seperti stres oksidatif.⁷¹

Mikroplastik juga dapat melekat pada permukaan sel epitel gingiva dan memicu respons inflamasi lokal. Partikel yang menempel pada mukosa oral dapat menyebabkan iritasi mekanis serta kerusakan sel epitel, yang selanjutnya merangsang pelepasan sitokin proinflamasi. Keberadaan mikroplastik dapat mengubah mikrolingkungan jaringan periodontal, yang pada akhirnya meningkatkan kerusakan jaringan dan proses inflamasi.⁷²

Apabila mikroplastik tertelan oleh jaringan oral, partikel ini berpotensi bermigrasi ke dalam sistem peredaran darah atau limfatik. Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa

partikel berukuran nano, termasuk mikroplastik, dapat menembus sawar darah-otak (*blood-brain barrier*) dan terakumulasi di berbagai organ tubuh. Dengan demikian, mikroplastik memiliki potensi untuk menyebar ke seluruh tubuh melalui jalur oral.⁷³

Mikroplastik dapat berperan sebagai iritan fisik terhadap jaringan periodontal sekaligus sebagai ancaman kimiawi, karena kemampuannya membawa berbagai zat aditif berbahaya. Untuk meningkatkan sifatnya, plastik sering dikombinasikan dengan senyawa kimia seperti *plasticizer*, penghambat api (*flame retardants*), dan penstabil. Beberapa zat tersebut, termasuk bisfenol A (BPA), ftalat, dan polibrominasi difenil eter (PBDE), dikenal sebagai *endocrine disruptors* yang dapat terlepas dari material plastik akibat proses degradasi atau kontak dengan cairan tubuh. Pelepasan zat aditif dari mikroplastik ini dapat menimbulkan berbagai efek merugikan pada jaringan periodontal dan struktur terkait, melalui mekanisme seperti induksi stres oksidatif, genotoksitas, serta respons inflamasi [22]. Spesies oksigen reaktif (*reactive oxygen species* atau ROS) yang dihasilkan akibat stres oksidatif dapat mengaktifkan berbagai jalur pensinyalan penting, seperti NF- κ B, MAPK, dan Nrf2, yang berperan dalam memicu inflamasi dan kerusakan jaringan gingiva. Paparan kronis terhadap mikroplastik, yang disertai dengan pelepasan bahan kimia toksik, dapat menyebabkan kondisi inflamasi yang persisten, yang merupakan salah satu karakteristik utama dari penyakit periodontal.

Meskipun pemahaman mengenai dampak mikroplastik terus berkembang, mekanisme pasti bagaimana mikroplastik memasuki jaringan periodontal dan berkontribusi terhadap progresi penyakit masih belum sepenuhnya dipahami.⁷⁴

Berbagai dampak yang ditimbulkan oleh mikroplastik telah dilaporkan, termasuk akumulasi dalam tubuh organisme

laut dan akuatik yang dapat menyebabkan malnutrisi, inflamasi, penurunan fertilitas, hingga kematian. Meskipun demikian, dampak mikroplastik terhadap tubuh manusia belum sepenuhnya dipahami secara jelas. Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa penyerapan mikroplastik berukuran sangat kecil dapat menyebabkan toksisitas kompleks pada organisme model seperti *zebrafish*, serta bahwa mikroplastik dengan ukuran di bawah 100 nm berpotensi mencapai hampir seluruh organ setelah memasuki tubuh manusia. Oleh karena itu, terdapat kekhawatiran yang semakin meningkat mengenai efek negatif dari akumulasi mikroplastik secara terus-menerus di dalam tubuh manusia.⁵⁴

Dampak kesehatan yang ditimbulkan oleh mikroplastik dapat bervariasi tergantung pada ukuran, bentuk, jenis, serta konsentrasinya. Mikroplastik dengan bentuk tajam berpotensi menyebabkan kerusakan fisik secara langsung pada jaringan tubuh, yang dapat memicu peradangan pada saluran pencernaan serta mengganggu keseimbangan mikrobiota usus. Kondisi ini berpotensi menimbulkan berbagai gejala gastrointestinal yang merugikan. Selain itu, bahan kimia yang digunakan dalam proses sintesis polimer plastik dapat bertindak sebagai pengganggu sistem endokrin (*endocrine disruptors*), yang berpotensi menyebabkan gangguan pada sistem reproduksi. Paparan mikroplastik yang terbawa udara juga dikaitkan dengan penyakit saluran pernapasan serta dapat memicu stres oksidatif pada jaringan paru-paru. Lebih lanjut, terdapat indikasi bahwa nanoplastik memiliki hubungan dengan kerusakan mitokondria pada sel-sel respiratori, yang dapat berdampak pada fungsi seluler dan kesehatan secara keseluruhan.⁵⁵

Pencemaran mikroplastik telah menjadi perhatian karena berpotensi menimbulkan dampak negatif terhadap keseimbangan lingkungan maupun kesehatan manusia. Paparan

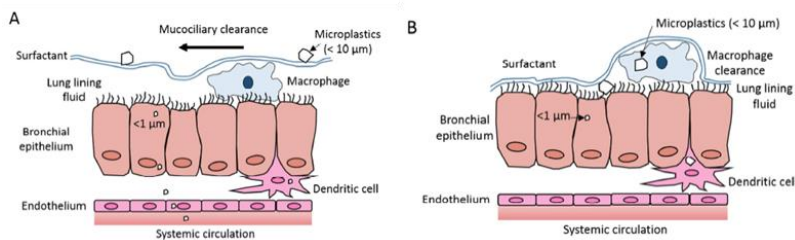
mikroplastik beserta konsekuensi yang ditimbulkannya perlu terus dipantau dan dievaluasi untuk memahami tingkat risiko yang mungkin terjadi dalam jangka pendek maupun jangka panjang. Dampak yang muncul akibat mikroplastik secara umum dapat dikelompokkan menjadi dua kategori utama, yaitu efek fisik dan efek kimiawi. Tingkat keparahan efek tersebut dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti ukuran partikel, bentuk mikroplastik, konsentrasi paparan, serta kemungkinan interaksi dengan senyawa kimia berbahaya lain yang turut dibawa atau terikat pada partikel mikroplastik.⁷⁵ Dengan demikian, karakteristik mikroplastik dan lingkungan paparannya menjadi aspek penting dalam menentukan potensi risiko terhadap organisme hidup.⁷⁵

1. POTENSI EFEK FISIK MIKROPLASTIK

Diperkirakan sekitar 90% mikroplastik yang masuk ke dalam tubuh dapat dieliminasi melalui feses. Meskipun demikian, sebagian partikel masih berpotensi mengalami retensi di dalam tubuh yang dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain ukuran partikel, bentuk, jenis polimer penyusun, serta keberadaan zat kimia tambahan yang melekat pada mikroplastik.⁷⁶ Hingga saat ini, mekanisme dan dampak fisik mikroplastik terhadap tubuh manusia belum sepenuhnya dipahami sehingga masih memerlukan penelitian lebih lanjut. Namun, sejumlah studi mengindikasikan bahwa paparan mikroplastik berpotensi memicu respons inflamasi, menimbulkan toksisitas yang berkaitan dengan ukuran partikel, menjadi media transfer senyawa berbahaya seperti *persistent organic pollutants* (POPs), serta mengganggu keseimbangan mikrobiota usus.⁷⁶ Faktor-faktor tersebut menunjukkan bahwa efek mikroplastik tidak hanya dipengaruhi oleh jumlah paparan,

tetapi juga oleh karakteristik partikel dan interaksinya dengan sistem biologis tubuh.⁷⁶

Mikroplastik dengan karakteristik tertentu, seperti ukuran yang sangat kecil dan sifat permukaan tertentu, berpotensi masuk ke dalam sel kemudian berpindah melalui jaringan menuju aliran limfatik maupun sirkulasi sistemik. Partikel yang terakumulasi di dalam tubuh tersebut diduga dapat memengaruhi fungsi sistem imun serta mengganggu kesehatan dan aktivitas seluler (Gambar 3).^{76,77} Mikroplastik juga diketahui dapat memasuki tubuh melalui berbagai jalur paparan, terutama sistem pernapasan (*airway*) dan saluran pencernaan. Setelah masuk, partikel tersebut berpotensi mengalami translokasi ke jaringan lain melalui mekanisme *endocytic uptake*, yaitu proses internalisasi partikel oleh sel yang memungkinkan penyebaran mikroplastik ke berbagai organ tubuh.^{76,77} Kondisi ini menunjukkan bahwa mikroplastik memiliki kemungkinan memberikan dampak biologis tidak hanya pada lokasi paparan awal, tetapi juga secara sistemik setelah terdistribusi di dalam tubuh.^{76,77}



Gambar 3. (A) Potensi mikroplastik ukuran 0,1-10 mikrometer uptake dan clearance. (B) jika partikel di udara dari mikropastik memungkinkan deposisi lebih dalam di paru-paru, maka dapat menembus lapisan paru-paru yang tipis kemudian mengalami translokasi melalui⁷⁸

Sebagai contoh, mikroplastik berukuran nanopartikel yang dihasilkan dari tindakan bedah berpotensi mengalami

perpindahan di dalam tubuh mengikuti dinamika kinetik partikel, sehingga memungkinkan material tersebut terserap dan terdistribusi melalui aliran darah maupun jaringan tubuh. Ketika partikel mikroplastik berinteraksi dengan jaringan epitel tertentu, partikel tersebut juga berpotensi berperan sebagai media pembawa (*vektor*) mikroorganisme, termasuk bakteri, yang dapat meningkatkan risiko timbulnya efek fisik secara langsung pada jaringan.⁷⁵⁻⁷⁸ Selain itu, Wright dan Kelly menyatakan bahwa mikroplastik yang masuk ke dalam tubuh melalui proses konsumsi dapat memicu berbagai respons biologis, seperti inflamasi jaringan, peningkatan proliferasi sel, terjadinya nekrosis, hingga penurunan fungsi sistem imun.⁷⁵⁻⁷⁸ Temuan tersebut menunjukkan bahwa dampak mikroplastik terhadap kesehatan tidak hanya berkaitan dengan keberadaan partikel itu sendiri, tetapi juga dipengaruhi oleh kemampuan partikel membawa agen lain serta memicu gangguan pada proses biologis tubuh.⁷⁵⁻⁷⁸

Beberapa studi eksperimental menunjukkan bahwa paparan mikroplastik berpotensi menimbulkan berbagai gangguan biologis pada organisme hidup. Johnson dkk. melaporkan bahwa mikroplastik dapat memicu agregasi trombosit serta menurunkan fungsi pernapasan pada hewan uji berupa kepiting biru.⁷⁹ Penelitian lain oleh Lusher dkk. menemukan terbentuknya granuloma sebagai respons imun pada kerang biru yang terpapar mikroplastik.⁸⁰ Sementara itu, studi Rochman dkk. terhadap ikan *Oryzias latipes* di Jepang menunjukkan adanya gangguan pada organ hati setelah hewan tersebut menelan fragmen polietilena.⁸¹ Hasil berbagai penelitian tersebut mengindikasikan bahwa mikroplastik berpotensi memengaruhi fungsi fisiologis dan respons biologis organisme, meskipun mekanisme dampaknya masih terus diteliti lebih lanjut.⁷⁹⁻⁸¹

Melalui jalur paparan oral, nanopartikel berpotensi ditransportasikan oleh sel M, yaitu sel epitel khusus yang terdapat pada mukosa yang berasosiasi dengan jaringan limfoid di usus. Setelah melewati barier tersebut, partikel dapat memasuki aliran darah dan selanjutnya berpindah melalui sistem limfatik menuju organ seperti hati dan kantung empedu.⁸² Distribusi mikroplastik atau nanopartikel secara sistemik melalui jalur oral diduga dapat menimbulkan berbagai dampak biologis, antara lain gangguan pada fungsi kardiopulmoner, perubahan metabolisme endogen, gangguan proses absorpsi nutrisi, efek genotoksik, peningkatan stres oksidatif, hingga munculnya respons inflamasi.⁸² Temuan ini menunjukkan bahwa paparan partikel berukuran sangat kecil tidak hanya berdampak pada saluran pencernaan sebagai tempat masuk awal, tetapi juga berpotensi memengaruhi berbagai sistem organ di dalam tubuh.⁸²

Mikroplastik (MPs) dengan bentuk yang tajam berpotensi menyebabkan kerusakan fisik langsung pada tubuh manusia, khususnya pada saluran pencernaan. Kondisi ini dapat memicu peradangan pada traktus gastrointestinal serta mengganggu keseimbangan mikrobiota usus. Gangguan tersebut selanjutnya dapat menimbulkan berbagai gejala gastrointestinal yang merugikan bagi individu. Selain itu, bahan kimia yang digunakan dalam proses sintesis polimer plastik dapat bertindak sebagai *endocrine disruptors*, yang berpotensi mengganggu sistem reproduksi.

Paparan mikroplastik melalui udara juga menjadi perhatian penting, karena dikaitkan dengan terjadinya penyakit pernapasan dan dapat memicu stres oksidatif pada jaringan paru. Lebih lanjut, partikel nanoplastik (NPs) diduga memiliki hubungan dengan kerusakan mitokondria

pada sel-sel sistem pernapasan, yang dapat berdampak pada fungsi seluler secara keseluruhan.

2. POTENSI EFEK KIMIAWI MIKROPLASTIK

Bahan kimia tambahan yang digunakan dalam proses pembuatan plastik serta akumulasi *persistent organic pollutants* (POPs) pada mikroplastik berpotensi menimbulkan efek toksik terhadap organisme hidup. Paparan langsung terhadap POPs maupun senyawa kimia lain yang melekat pada partikel mikroplastik diduga dapat mengganggu berbagai sistem biologis dan menjadi ancaman bagi kesehatan manusia, bahkan ketika paparan terjadi dalam konsentrasi rendah.⁸³ Meskipun demikian, hingga saat ini masih belum tersedia data yang sepenuhnya pasti mengenai besarnya risiko atau tingkat ancaman yang ditimbulkan oleh komponen kimia yang berkaitan dengan mikroplastik. Namun, paparan yang berlangsung secara terus-menerus dalam jangka panjang diperkirakan dapat meningkatkan akumulasi dan memperbesar potensi efek toksisitas terhadap tubuh.⁸³

Salah satu jalur utama masuknya mikroplastik ke dalam tubuh manusia terjadi melalui kontaminasi pada bahan pangan yang kemudian masuk ke sistem pencernaan. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa paparan mikroplastik dapat berasal dari konsumsi makanan dan minuman, termasuk gula, garam, minuman beralkohol, air minum, serta produk pangan yang dikemas.⁸⁴

Partikel plastik di lingkungan dapat tertelan, diserap, dicerna, serta dieliminasi atau bahkan tertahan di dalam saluran pencernaan manusia, sebagaimana juga diamati pada ikan dan organisme lainnya. Masuknya mikroplastik ke dalam traktus gastrointestinal berpotensi memodifikasi komposisi mikrobiota usus, sebagaimana dibuktikan dalam berbagai penelitian

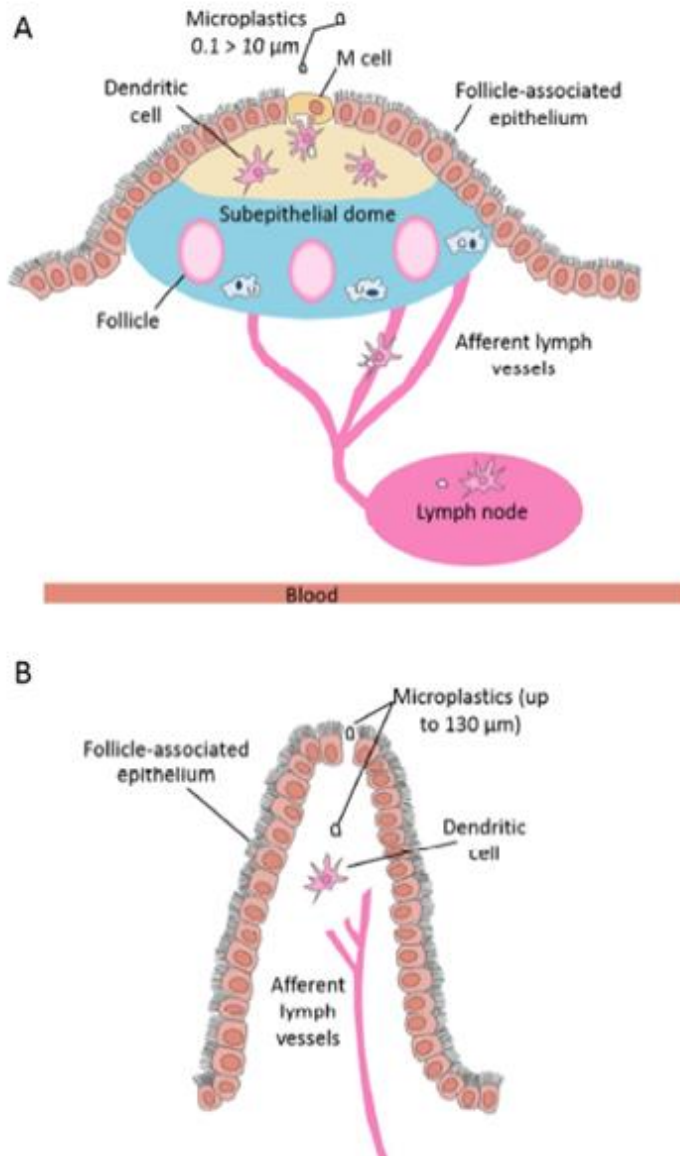
menggunakan model organoid manusia. Selain itu, keberadaan mikroplastik juga dapat menimbulkan berbagai gangguan fisik, seperti abrasi, perforasi, malnutrisi, cedera mekanis, hingga obstruksi pada sistem pencernaan. Lebih lanjut, mikroplastik memiliki potensi untuk mengalami translokasi ke organ pencernaan lainnya, seperti hati. Sebagai contoh, sejumlah partikel mikroplastik telah terdeteksi dalam sampel jaringan hati, baik pada kondisi normal maupun sirosis, dengan jumlah yang dilaporkan lebih tinggi pada hati dengan sirosis dibandingkan hati normal. Temuan ini menunjukkan adanya kemungkinan akumulasi mikroplastik dalam organ tubuh manusia yang dapat berimplikasi terhadap gangguan fungsi organ dan kesehatan secara keseluruhan.⁸⁵

Meskipun efek merugikan mikroplastik telah banyak dilaporkan pada organisme laut, dampaknya terhadap kesehatan manusia masih belum banyak diteliti secara mendalam. Oleh karena itu, pembahasan mengenai hubungan antara mikroplastik dengan kesehatan dan penyakit pada manusia sebagian besar masih didasarkan pada studi *in vitro*, penelitian manusia berskala kecil, serta ekstrapolasi dari temuan pada organisme laut. Sebagai contoh, beberapa efek merugikan mikroplastik terhadap sistem pembuluh darah yang telah dilaporkan meliputi genotoksisitas dan sitotoksisitas. Dalam suatu studi *in vitro*, limfosit darah perifer manusia yang diisolasi diinkubasi dengan mikroplastik polietilena berukuran 10–45 µm, yang kemudian menunjukkan adanya potensi gangguan pada tingkat seluler.⁸⁶

Partikel mikroplastik berukuran <150 µm diketahui berpotensi menembus epitel saluran pencernaan pada mamalia, dengan perkiraan sekitar 0,3% partikel dapat terabsorpsi oleh tubuh. Selain itu, partikel yang berukuran >10 µm diduga mampu melewati membran sel, bahkan menembus *blood-brain barrier* serta plasenta.^{94,95} Sementara itu, mikroplastik

berukuran $<2,5 \mu\text{m}$ yang tertelan dapat masuk ke saluran pencernaan melalui proses endositosis oleh sel M.^{94,95} Selanjutnya, sel tersebut akan mentransfer partikel dari lumen usus halus menuju jaringan limfoid mukosa atau melalui mekanisme *paracellular persorption*. Proses *persorption* memungkinkan partikel melewati celah pada lapisan epitel saluran pencernaan secara mekanis hingga akhirnya masuk ke sirkulasi sistemik.^{94,95,102} (Gambar 4)

Paparan mikroplastik dilaporkan meningkatkan frekuensi pembentukan mikronukleus, jembatan nukleoplasma, serta tunas inti dalam sel-sel darah. Perubahan-perubahan ini berkaitan dengan terjadinya kerusakan genetik dan ketidakstabilan genom, yang selanjutnya telah dikaitkan dengan berbagai gangguan kesehatan, seperti infertilitas, diabetes, obesitas, penyakit kardiovaskular (termasuk penyakit arteri koroner), penyakit ginjal kronis, kanker, serta gangguan neurologis, termasuk penyakit Alzheimer dan penyakit Parkinson.¹⁰³



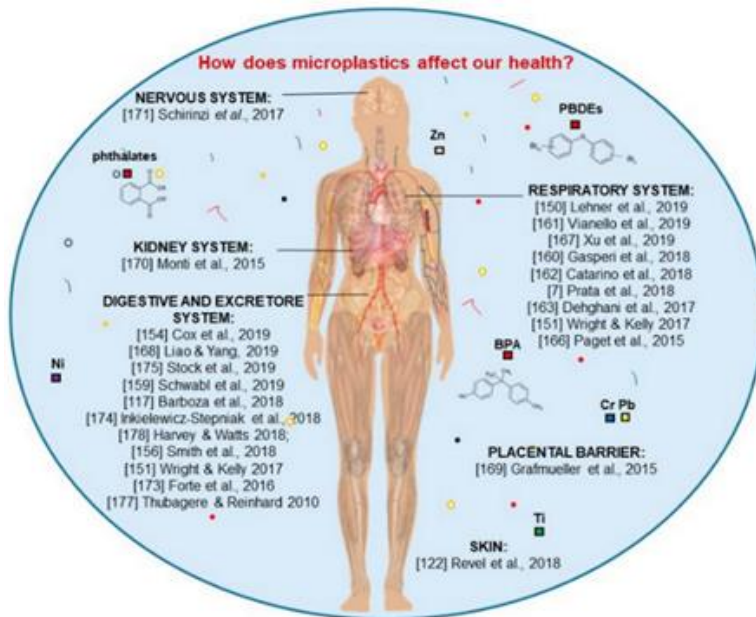
Gambar 4. (A) mikroplastik uptake melalui saluran pencernaan secara endocytosis oleh sel M, (B) mikroplastik uptake melalui lumen saluran pencernaan secara paracellular persorption⁹⁴

Mikroplastik yang menetap di dalam tubuh dapat memicu respons inflamasi, yang diduga berkaitan dengan sifat

hidrofobik serta komposisi kimia yang terkandung di dalamnya. Asumsi ini didukung oleh temuan mikroplastik pada feses manusia, yaitu sekitar 20 partikel per 10 g feses, yang umumnya berupa polietilen dan polipropilena dengan ukuran berkisar 5–500 nm (Gambar 5).¹⁰⁴

Jalur lain masuknya mikroplastik ke dalam tubuh manusia adalah melalui sistem pernapasan, yaitu lewat proses inhalasi.¹⁰⁵ Mikroplastik dapat terbawa oleh angin, endapan atmosfer, debu udara, maupun aerosol sehingga mudah terhirup. Dampak dari mikroplastik yang terinhalasi meliputi gangguan pada sistem pernapasan, toksisitas, respons inflamasi, hingga potensi pemicu penyakit autoimun. Selain itu, jaringan pelindung paru-paru yang sangat tipis (<1 mikrometer) memungkinkan partikel berukuran nano untuk menembus barier tersebut, masuk ke aliran darah, dan kemudian tersebar ke seluruh tubuh.¹⁰⁵ (Gambar 6)

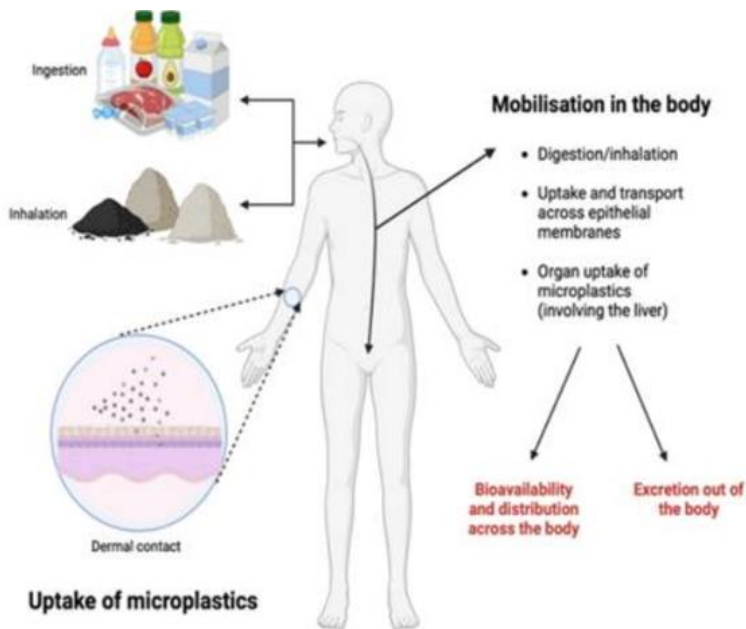
Hasil kajian menunjukkan bahwa partikel polistirena berukuran <50 nm dapat menyebabkan genotoksisitas dan sitotoksisitas pada sel epitel paru-paru serta makrofag, seperti Calu-3 dan THP-1.¹⁰⁶



Gambar 5. Pengaruh mikroplastik terhadap kesehatan⁹³

Mikroplastik juga dapat ditemukan dalam beberapa formulasi obat yang menggunakan bahan berbasis plastik. Keberadaan plastik dalam obat tersebut berfungsi sebagai sistem penghantaran untuk membantu transport zat aktif ke dalam tubuh.⁹⁴ Setelah dikonsumsi, partikel ini berpotensi masuk ke sirkulasi sistemik.

Menurut House of Commons Environmental Audit Committee of the UK Parliament, dampak mikroplastik yang berasal dari obat-obatan diperkirakan serupa dengan mikroplastik yang berasal dari lingkungan laut ketika memasuki jaringan manusia. Namun demikian, hingga saat ini bukti ilmiah yang tersedia masih terbatas, dan mekanisme interaksi antara mikroplastik dengan jaringan tubuh manusia belum dapat dipahami secara pasti.¹⁰⁸



Gambar 6. Jalur masuk mikroplastik⁴⁰

Semakin banyak penelitian menunjukkan bahwa mikro- dan nanoplastik (MNP) bukanlah bahan yang “diam” atau tidak berpengaruh di dalam tubuh. Sebaliknya, partikel-partikel ini dapat bertindak sebagai zat berbahaya dari lingkungan yang mampu membawa bahan kimia lain, mengganggu keseimbangan sel, dan dalam jangka panjang mungkin berperan dalam munculnya berbagai penyakit, termasuk kanker. Berbagai studi eksperimental menunjukkan bahwa paparan MNP dapat memicu stres oksidatif dan peradangan, merusak sel, serta mengganggu sistem kekebalan tubuh. Selain itu, MNP juga diduga dapat mengubah keseimbangan bakteri di usus, memengaruhi kesuburan, serta berdampak pada perkembangan sistem saraf. Bahkan, beberapa penelitian menemukan bahwa partikel berukuran sangat kecil ini mampu menembus penghalang penting dalam tubuh, seperti sawar darah-otak dan plasenta.¹⁰⁹

Dalam konteks kesehatan mulut, topik ini masih belum banyak dibahas, padahal kita sebenarnya terpapar MNP setiap hari. Partikel ini dapat masuk ke dalam tubuh melalui bahan kedokteran gigi maupun produk perawatan mulut yang digunakan sehari-hari. Dari penelitian laboratorium (*in vitro*), diketahui bahwa MNP berpotensi mengiritasi jaringan mulut, memengaruhi keseimbangan mikroorganisme, serta menunjukkan efek merusak pada sel-sel mulut, seperti sel epitel dan fibroblas. Namun, dampak nyata pada manusia dalam kehidupan sehari-hari masih belum sepenuhnya dipastikan. Paparan jangka panjang di rongga mulut bahkan diduga dapat berperan dalam peradangan gusi atau perkembangan kanker, meskipun hingga saat ini bukti klinis yang kuat masih terbatas.

110

Material berbasis resin yang banyak digunakan dalam kedokteran gigi, seperti PMMA, Bis-GMA, dan UDMA, diketahui dapat melepaskan partikel-partikel kecil selama proses pemasangan, penghalusan, maupun penggunaan sehari-hari. Selain itu, berbagai alat dan produk yang kita gunakan sehari-hari, seperti pasta poles, benang gigi, sikat gigi, pasta gigi, hingga clear aligner, juga dapat menghasilkan serpihan mikro selama pemakaian. Perkembangan kedokteran gigi memang telah beralih dari bahan tradisional seperti logam dan gading ke bahan plastik modern yang lebih praktis dan estetis. Namun, di balik manfaat tersebut, muncul konsekuensi yang perlu diperhatikan, yaitu pelepasan mikro- dan nanoplastik secara tidak langsung selama perawatan dan kebiasaan kebersihan mulut. Oleh karena itu, isu ini menjadi penting untuk dipahami lebih lanjut karena berpotensi berdampak pada kesehatan manusia dan lingkungan.¹¹¹

Permasalahan mikroplastik didasarkan pada asumsi bahwa partikel ini dapat memberikan dampak negatif terhadap organisme melalui berbagai mekanisme. Sejumlah penelitian

laboratorium dan studi pada hewan menunjukkan bahwa stres oksidatif merupakan faktor utama yang mendasari kerusakan jaringan akibat paparan mikroplastik. Beberapa studi melaporkan bahwa nanopartikel polistirena dapat memicu pembentukan *reactive oxygen species* (ROS), disfungsi mitokondria, serta kerusakan DNA pada berbagai lini sel manusia.

Perubahan pada tingkat seluler tersebut umumnya diikuti oleh peningkatan mediator inflamasi, yang ditandai dengan produksi sitokin proinflamasi seperti IL-6, IL-1 β , dan TNF- α . Selain itu, mikroplastik juga dapat berinteraksi dengan lapisan epitel pada saluran pencernaan dan paru-paru, sehingga berpotensi menurunkan fungsi protektif jaringan tersebut serta membuka peluang bagi partikel untuk memasuki sirkulasi sistemik tubuh.

Studi eksperimental pada hewan menunjukkan bahwa partikel mikroplastik dan nanoplastik dapat mengalami translokasi melintasi berbagai barier biologis dan masuk ke dalam sirkulasi sistemik setelah tertelan atau terhirup. Meskipun fenomena ini telah diamati pada model hewan, bukti yang meyakinkan pada manusia masih terbatas, sehingga signifikansi klinisnya belum dapat dipastikan secara definitif.

Setelah terinternalisasi, mikroplastik berpotensi memicu respons inflamasi, memodulasi sistem imun, serta menyebabkan stres pada tingkat jaringan. Namun demikian, temuan ini tidak serta-merta menunjukkan adanya mekanisme langsung yang menyebabkan transfer sel kanker atau efek karsinogenik secara langsung pada manusia.

BAB 3

CARA MENDETEKSI MIKROPLASTIK

Metode konvensional untuk pemisahan mikroplastik umumnya dilakukan secara manual, yaitu dengan memisahkan dan mengidentifikasi partikel secara visual, baik tanpa bantuan mikroskop maupun dengan bantuan mikroskop. Proses identifikasi juga dapat dilakukan melalui teknik pewarnaan untuk membantu membedakan mikroplastik dari material lain. Namun, metode pemisahan secara manual ini cenderung membutuhkan waktu yang lama dan memiliki keterbatasan, karena partikel yang sangat kecil berpotensi tidak terdeteksi atau terlewatkan.¹⁰⁸

Seiring berjalan waktu, dikembangkan metode-metode untuk pemisahan mikroplastik sebagai berikut¹⁰⁸⁻¹¹¹

1. PEMISAHAN MANUAL

Metode pemisahan manual merupakan tahap dasar yang hampir selalu digunakan dalam alur analisis mikroplastik, dengan teknik utama berupa penyaringan (sieving) dan filtrasi. Proses sieving dilakukan menggunakan serangkaian ayakan dengan ukuran pori yang semakin kecil, yang berfungsi sebagai tahap awal untuk memisahkan partikel berukuran besar yang tidak menjadi target analisis, seperti fragmen jaringan, rambut, atau debris makroskopis

lainnya. Selain itu, teknik ini juga memungkinkan fraksinasi sampel berdasarkan ukuran partikel, Namun demikian, metode ini tidak mampu secara efektif mengisolasi mikroplastik yang tersebar halus bersama komponen organik maupun anorganik berukuran kecil, sehingga tidak dapat digunakan sebagai satu-satunya metode pemisahan.¹¹²

Sebagai tahap lanjutan, filtrasi merupakan metode utama dalam mengonsentrasikan mikroplastik dari sampel cair, umumnya setelah proses digesti untuk menghilangkan komponen biologis yang dapat mengganggu analisis. Pada metode ini, sampel cair dilewatkan melalui membran filter dengan ukuran pori tertentu sehingga partikel mikroplastik tertahan pada permukaan filter dan kemudian dapat dianalisis lebih lanjut menggunakan mikroskopi atau teknik spektroskopi. Berbagai jenis material filter dapat digunakan, seperti kaca serat (glass fiber), polikarbonat, selulosa nitrat, maupun alumina, yang masing-masing memiliki karakteristik kimia dan fisik yang berbeda serta memengaruhi efisiensi penangkapan partikel. Pemilihan ukuran pori menjadi faktor penting dalam desain penelitian, karena pori yang lebih kecil memang mampu menangkap partikel yang lebih halus, tetapi di sisi lain lebih rentan mengalami penyumbatan, terutama ketika sampel masih mengandung sisa material organik yang belum sepenuhnya terurai.¹¹³

2. PEMISAHAN DENGAN MASSA JENIS (DENSITAS)

Metode ini digunakan untuk memisahkan mikroplastik dari sampel pasir pantai dengan prinsip pemisahan berdasarkan densitas. Prosesnya melibatkan pengapungan partikel mikroplastik, sementara partikel yang lebih padat akan mengalami pengendapan. Larutan yang digunakan dalam teknik ini harus bersifat tidak merusak atau

mengubah struktur polimer mikroplastik. Beberapa larutan yang umum digunakan antara lain air garam (NaCl), natrium iodida (NaI), serta natrium politungstat (PST).

3. CHEMICAL DIGESTION (PENGURAIAN SECARA KIMIA)

Metode ini dilakukan dengan menggunakan proses oksidasi menggunakan peroksida dalam kondisi basa, asam, atau netral. *The National Oceanic and Atmospheric Administration* (Silver Spring, MD, USA; NOAA) Marine Debris Program telah mengembangkan panduan penggunaan oksidasi peroksida untuk mengekstraksi mikroplastik dari sampel air dan sedimen. Prosedur ini umumnya menggunakan larutan H_2O_2 30% dengan penambahan Fe sebagai katalis, yang kemudian dilanjutkan dengan proses pemanasan serta pengeringan untuk memisahkan mikroplastik dari matriks sampel.

4. ENZYME DIGESTION (PENGURAIAN DENGAN ENZIM)

Metode ini digunakan untuk menghancurkan materi biogenik guna mempermudah isolasi mikroplastik. Salah satu teknik yang umum diterapkan adalah penggunaan larutan KOH 10% untuk mencerna jaringan saluran pencernaan, sehingga partikel mikroplastik dapat dipisahkan dari sampel ikan yang terkontaminasi.

Terlepas dari metode pemisahan dan digesti yang digunakan, penerapan sistem *Quality Assurance* dan *Quality Control* (QA/QC) yang ketat merupakan komponen esensial untuk menjamin keakuratan serta keandalan data akhir. Hal ini menjadi sangat penting karena mikroplastik telah

tersebar luas di lingkungan, terutama dalam bentuk serat dari tekstil maupun fragmen dari berbagai material laboratorium, sehingga risiko kontaminasi selama proses preparasi sampel tergolong tinggi. Tanpa pengendalian yang memadai, akan sangat sulit membedakan antara mikroplastik yang действительно berasal dari sampel asli dengan partikel yang masuk selama proses penanganan di laboratorium.¹¹⁴

Oleh karena itu, sejumlah langkah QA/QC perlu diterapkan secara konsisten. Proses preparasi sampel sebaiknya dilakukan di lingkungan udara bersih, seperti *laminar flow hood*, untuk meminimalkan kontaminasi partikulat dari udara sekitar. Seluruh personel laboratorium dianjurkan menggunakan pakaian non-sintetik, seperti jas laboratorium berbahan katun, guna mengurangi risiko pelepasan serat tekstil sintetis. Selain itu, seluruh peralatan gelas dan instrumen kerja harus dibersihkan secara menyeluruh, dibilas menggunakan air ultrapure yang telah disaring, serta ditutup dengan aluminium foil ketika tidak digunakan untuk mencegah deposisi partikel dari lingkungan.¹¹⁴

Komponen paling krusial dalam QA/QC adalah penggunaan *procedural blanks*, yang wajib dilakukan dalam setiap rangkaian analisis. Blanko ini berisi seluruh reagen yang digunakan dalam prosedur, namun tanpa sampel utama, dan diproses secara paralel dengan sampel sebenarnya. Partikel yang terdeteksi pada blanko mencerminkan tingkat kontaminasi prosedural, sehingga harus dihitung dan dikurangkan dari hasil analisis sampel. Apabila tingkat kontaminasi terlalu tinggi, maka seluruh rangkaian analisis dapat dinyatakan tidak valid dan perlu diulang. Dengan demikian, penerapan QA/QC yang ketat menjadi dasar penting dalam menghasilkan data yang dapat

dipertanggungjawabkan pada analisis mikroplastik sebagai kontaminan jejak.¹¹⁴

5. NILE RED SOLUTION (NR)

Metode ini digunakan untuk memisahkan mikroplastik pada sampel air, termasuk air kemasan. Larutan NR diinjeksi dengan konsentrasi 10 µg/mL ke dalam botol air, kemudian didiamkan selama ±30 menit agar terjadi interaksi dengan partikel yang ada. Selanjutnya, sampel dituangkan ke dalam wadah yang dilengkapi kertas saring untuk proses penyaringan. Hasil filtrasi kemudian diamati menggunakan mikroskop optik untuk mengidentifikasi keberadaan mikroplastik.

Nile red (9-diethylamino-5H-benzo[*a*]phenoxazine-5-one) merupakan larutan lipofilik dan pertama kali diperkenalkan oleh Greenspan, Mayer dan Fowler pada tahun 1985. NR pertama kali digunakan untuk mendeteksi partikel lemak di dalam sel dan larutan ini memiliki tingkat sensitivitas yang tinggi sebagai larutan fluoresen pada berbagai tipe sel.¹¹⁹

Penggunaan *Nile red* (NR) untuk identifikasi mikroplastik pertama kali diperkenalkan oleh Andrady pada tahun 2010, dan sejak itu penggunaannya terus meningkat hingga saat ini.^{120,121} NR dapat larut dalam air, serta menunjukkan peningkatan fluoresensi ketika berinteraksi dengan agen hidrofobik. Selain itu, NR dikenal sebagai larutan solvatochromic, yaitu larutan yang dapat menyebabkan perubahan warna pada pelarut dengan tingkat gradasi warna yang dipengaruhi oleh polaritas permukaan material. Studi oleh Gagné et al. menggunakan polistirena transparan menunjukkan bahwa NR mampu mendeteksi mikroplastik hingga skala nanopartikel berukuran 50–100 nm.¹²²

Nile red Nile red bekerja melalui mekanisme pewarnaan, di mana larutan ini diserap oleh permukaan partikel sehingga menghasilkan fluoresensi pada partikel yang telah diberi pewarna. NR memiliki rentang konsentrasi optimum antara 1 hingga 1000 $\mu\text{g/mL}$ dengan waktu inkubasi berkisar dari 5 menit hingga 66 jam. Namun, konsentrasi kerja yang umum digunakan untuk pewarnaan mikroplastik adalah sekitar 10 $\mu\text{g/mL}$ dengan waktu inkubasi selama ± 30 menit.¹²³

Dapat dilakukan penambahan pemeriksaan laboratorium lain sebagai langkah konfirmasi terhadap partikel yang telah diperoleh, dengan menggunakan berbagai instrumen analisis berikut:^{28,99,124}

1. MELIHAT SECARA MANUAL

2. RAMAN SPECTROSCOPY

Raman spectroscopy Raman spectroscopy bekerja dengan cara meradiasi sampel menggunakan sumber laser monokromatik. Panjang gelombang laser yang digunakan umumnya berkisar antara 500 hingga 800 nm. Teknik ini telah banyak dimanfaatkan dalam analisis mikroplastik oleh berbagai peneliti, seperti Cole dkk., Van Cauwenberghe dkk., Murray dan Cowie dkk., serta Imhof dkk. Interaksi antara sinar laser dengan molekul dan atom pada sampel menghasilkan spektrum frekuensi yang berbeda, sehingga memungkinkan identifikasi dan analisis partikel secara lebih akurat.¹²⁵

Spektroskopi Raman melengkapi teknik FTIR dengan mendeteksi getaran molekul melalui hamburan cahaya tidak elastis. Dengan menggunakan laser cahaya tampak atau inframerah-dekat yang difokuskan melalui mikroskop, metode Raman mampu menganalisis partikel dengan ukuran yang jauh lebih kecil, yaitu hingga sekitar 1 μm , yang dibatasi

terutama oleh batas difraksi optik [86]. Ukuran titik laser yang lebih kecil pada Raman memberikan resolusi spasial yang lebih tinggi, sehingga memungkinkan deteksi mikroplastik berukuran sangat kecil hingga beberapa mikrometer, bahkan dalam kondisi tertentu dapat mencapai ukuran sub-mikrometer dengan teknik khusus seperti *surface-enhanced Raman spectroscopy*.⁵⁵

Spektrum Raman juga memberikan spesifisitas polimer yang tinggi, dan dalam beberapa kasus mampu membedakan aditif polimer maupun tingkat kristalinitas material. Keunggulan praktis lainnya adalah kemampuan Raman untuk menganalisis partikel pada hampir semua jenis substrat, termasuk kaca atau filter logam yang tidak dapat digunakan pada FTIR karena bersifat opak terhadap inframerah. Selain itu, teknik ini relatif tidak terpengaruh oleh keberadaan air, sehingga sampel yang lembap atau hidrogel terhidrasi masih dapat dianalisis secara langsung.⁹

Namun demikian, spektroskopi Raman juga memiliki beberapa keterbatasan. Fluoresensi yang berasal dari pewarna atau bahan organik dalam sampel dapat mengganggu atau bahkan menutupi sinyal Raman, yang menjadi isu penting karena material komposit gigi sering mengandung pigmen dan agen fluoresen. Selain itu, penggunaan daya laser yang tinggi dapat menyebabkan pemanasan, pembakaran, atau perubahan struktur partikel plastik, terutama pada partikel berwarna gelap, sehingga dapat memengaruhi hasil analisis.⁵⁶

Dari segi *throughput*, pemetaan Raman konvensional yang dilakukan titik per titik cenderung memerlukan waktu yang lama, bahkan hingga berjam-jam untuk memindai satu filter dalam menemukan partikel berukuran kecil. Meskipun demikian, perkembangan teknologi pencitraan Raman berkecepatan tinggi, seperti pemetaan otomatis atau *wide-*

field imaging, mulai meningkatkan efisiensi analisis. Secara umum, metode Raman masih dianggap memiliki kapasitas analisis yang lebih rendah dibandingkan FTIR dalam studi mikroplastik. Biaya perangkat mikroskop Raman berkualitas penelitian juga relatif setara atau bahkan lebih tinggi dibandingkan FTIR, serta memerlukan operator yang berpengalaman. Terlepas dari berbagai keterbatasan tersebut, spektroskopi Raman tetap sangat penting dalam mendeteksi mikroplastik berukuran kecil yang tidak dapat teridentifikasi oleh FTIR. Oleh karena itu, banyak penelitian mengombinasikan kedua teknik ini untuk memperoleh analisis mikroplastik yang lebih komprehensif dan akurat.⁵⁷

3. FOURIER TRANSFORM INFRARED SPECTROSCOPY (FTIR),

Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) memberikan akurasi yang lebih tinggi dalam identifikasi polimer plastik dibandingkan beberapa teknik lain, berdasarkan karakteristik spektrum inframerah dari partikel yang dianalisis. Hal ini telah dibuktikan melalui berbagai penelitian oleh Thompson dkk., Ng dan Obbard, Vianello dkk., Harrison dkk., Frias dkk., serta Reddy dkk.

FTIR dan *Raman spectroscopy* saling melengkapi dalam analisis mikroplastik, karena tidak semua vibrasi molekul dapat teraktivasi oleh Raman, namun dapat terdeteksi melalui FTIR. Teknik FTIR memanfaatkan radiasi inframerah yang menyebabkan terjadinya vibrasi pada molekul ketika berinteraksi dengan sampel. Vibrasi yang dihasilkan sangat bergantung pada komposisi dan struktur molekul, sehingga menghasilkan panjang gelombang spesifik yang dapat digunakan untuk identifikasi material.^{86,87}

Mikrospektroskopi FTIR merupakan salah satu metode utama (*workhorse*) dalam identifikasi mikroplastik. Teknik ini bekerja dengan mendeteksi getaran ikatan kimia, sehingga menghasilkan spektrum khas yang berbeda untuk setiap jenis polimer. Metode *attenuated total reflectance micro-FTIR* (ATR micro-FTIR) mampu menganalisis partikel dengan ukuran hingga sekitar 20 μm , bahkan dapat mencapai $\sim 10 \mu\text{m}$ dengan pengaturan khusus.⁵⁶

Setiap polimer yang umum digunakan dalam kedokteran gigi, seperti polymethyl methacrylate (PMMA) pada gigi tiruan, resin berbasis Bis-GMA (bisphenol A-glycidyl methacrylate) dan TEGDMA (triethylene glycol dimethacrylate) pada komposit, serta polietilena pada mikrobutan, memiliki “sidik jari” inframerah yang unik. Hal ini memungkinkan identifikasi polimer dengan tingkat spesifisitas yang tinggi. FTIR bekerja optimal pada partikel yang telah diisolasi dan diletakkan pada substrat atau filter yang transparan terhadap inframerah. Dalam praktiknya, sampel seperti saliva, air, atau debu perlu melalui proses filtrasi atau pengeringan terlebih dahulu, karena air dan komponen lain dapat mengganggu penyerapan inframerah.⁵⁶

Metode ini bersifat non-destruktif dan bahkan dapat digunakan untuk menganalisis partikel yang tertanam dalam preparat tipis, seperti mikroplastik dalam biopsi jaringan, meskipun adanya penyerapan inframerah oleh matriks dapat mempersulit analisis. Sistem pencitraan FTIR modern yang dilengkapi dengan detektor *focal plane array* memungkinkan pemindaian seluruh permukaan filter dan pemetaan ribuan partikel secara otomatis, sehingga meningkatkan efisiensi analisis; beberapa sistem bahkan mampu menyelesaikan analisis dalam waktu kurang dari satu jam.⁷⁰

Meskipun biaya sistem mikroskop FTIR relatif tinggi, teknologi ini telah tersedia di banyak laboratorium, didukung oleh basis data spektrum polimer yang luas. Namun, metode ini memiliki keterbatasan dalam hal ukuran deteksi, karena FTIR konvensional tidak dapat secara andal mendeteksi nanoplastik. Hal ini disebabkan oleh panjang gelombang cahaya inframerah menengah ($\sim 10 \mu\text{m}$) yang lebih besar daripada ukuran partikel nanoplastik itu sendiri. Dengan demikian, FTIR efektif digunakan untuk mendeteksi mikroplastik berukuran puluhan mikrometer ke atas, tetapi tidak optimal untuk partikel berukuran nano. Selain itu, partikel yang saling tumpang tindih atau partikel komposit yang mengandung campuran polimer maupun bahan pengisi dapat menghasilkan spektrum yang kompleks dan sulit diinterpretasikan.⁷⁰

4. SCANNING ELECTRON MICROSCOPY (SEM).

Digunakan untuk mengamati detail struktur serta permukaan material secara lebih mendalam.¹²⁸ *Scanning Electron Microscopy* (SEM) menghasilkan citra dengan resolusi sangat tinggi yang menggambarkan morfologi permukaan serta karakteristik struktur suatu material. Informasi yang diperoleh melalui SEM dapat dimanfaatkan untuk membedakan partikel plastik dan non-plastik, serta digunakan sebagai metode *screening* mikroplastik.¹²⁹

Mikroskop elektron pemindai banyak digunakan untuk memvisualisasikan morfologi partikel mikroplastik dan nanoplastik. Teknik ini mampu memperbesar objek hingga skala nano, sehingga dapat dengan mudah mencitrakan partikel berukuran jauh di bawah $1 \mu\text{m}$ yang berada di luar batas resolusi optik. Dalam konteks material kedokteran gigi, SEM telah digunakan untuk menunjukkan kekasaran permukaan debris hasil keausan komposit dan

polimer, serta struktur berserat dari mikrofiber pada masker.⁷¹

Rentang deteksi SEM pada dasarnya dibatasi oleh resolusi instrumen (hingga puluhan nanometer) serta kemampuan membedakan partikel dari latar belakangnya. Dalam suatu studi, SEM berhasil mengidentifikasi partikel yang berasal dari *aligner* dengan ukuran sekitar 5 μm , sekaligus mengonfirmasi keberadaannya pada filter bersama dengan analisis spektroskopi.⁷²

Namun demikian, SEM tidak dapat secara langsung mengidentifikasi komposisi polimer, karena teknik ini hanya memberikan informasi mengenai ukuran, bentuk, dan topografi permukaan partikel. Banyak sistem SEM dilengkapi dengan spektroskopi sinar-X dispersif energi (*Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy* atau EDS), tetapi metode ini hanya mendeteksi komposisi unsur, seperti keberadaan silikon dari bahan pengisi atau klorin pada polivinil klorida, bukan jenis polimernya. Oleh karena itu, SEM umumnya digunakan bersamaan dengan teknik FTIR atau Raman, di mana SEM digunakan untuk memvisualisasikan dan menghitung partikel, kemudian analisis spektroskopi dilakukan untuk menentukan jenis polimer pada lokasi yang sama.⁴¹

Penggunaan SEM memerlukan persiapan sampel yang cukup ketat, yaitu dalam kondisi kering karena analisis dilakukan dalam ruang vakum, serta sering kali membutuhkan pelapisan konduktif berupa lapisan tipis logam pada partikel plastik yang bersifat isolator untuk mencegah efek pengisian muatan. Hal ini menyebabkan matriks biologis seperti saliva atau jaringan harus dihilangkan atau difiksasi dan dikeringkan secara memadai, yang dapat meningkatkan risiko kontaminasi. Dari segi *throughput*, SEM tergolong rendah hingga sedang; meskipun

tersedia perangkat lunak untuk analisis ukuran partikel secara otomatis, pemeriksaan dalam jumlah besar tetap memerlukan waktu yang cukup lama, dan hanya partikel yang berada di permukaan sampel yang dapat terdeteksi.⁴¹

Biaya pengadaan dan pemeliharaan instrumen SEM juga relatif tinggi, termasuk kebutuhan pompa vakum dan sumber elektron, serta memerlukan operator dengan keahlian khusus. Meskipun demikian, SEM tetap menjadi salah satu alat yang sangat penting, terutama dalam identifikasi nanoplastik, karena merupakan salah satu metode yang memungkinkan konfirmasi visual keberadaan partikel berukuran nano. Beberapa penelitian telah menggunakan SEM untuk mendeteksi partikel sekitar 100 nm dari degradasi plastik dalam kondisi terkontrol, meskipun perbedaan antara partikel sebenarnya dan artefak masih menjadi tantangan.⁷³

5. PYROLYSIS-GASCHROMATOGRAPHY-MASS SPECTROMETRY (PY-GC-MS)

Py-GC-MS menggunakan pendekatan yang berbeda secara mendasar, yaitu dengan menghancurkan sampel untuk mengungkapkan tanda kimianya. Dalam teknik ini, sampel yang mengandung partikel plastik dipanaskan pada suhu tinggi (sekitar 500–700 °C) dalam kondisi tanpa oksigen, sehingga polimer terurai menjadi molekul-molekul kecil khas yang disebut produk pirolisis (*pyrolyzates*). Fragmen-fragmen ini kemudian dipisahkan menggunakan kromatografi gas (*gas chromatography*) dan diidentifikasi melalui spektrometri massa (*mass spectrometry*), menghasilkan “sidik jari” kimia yang dapat dicocokkan dengan jenis polimer tertentu.⁷⁴

Metode Py-GC-MS memiliki spesifisitas tinggi terhadap jenis polimer serta sensitivitas yang sangat baik, bahkan mampu mendeteksi polimer dalam jumlah nanogram. Teknik ini sangat efektif untuk mengidentifikasi dan mengkuantifikasi jenis polimer dalam campuran kompleks, serta sering digunakan untuk mengukur kandungan total plastik dalam sampel lingkungan, misalnya jumlah polietilena per gram sedimen. Dalam konteks kedokteran gigi, Py-GC-MS dapat digunakan untuk menentukan apakah mikroplastik dalam debu klinik didominasi oleh polymethyl methacrylate (PMMA) dari gigi tiruan atau polietilena dari bahan sekali pakai seperti lap atau pelindung.⁴¹

Keunggulan utama metode ini adalah tidak bergantung pada ukuran partikel, sehingga plastik berukuran nano tetap dapat terdeteksi selama massanya ada. Hal ini menjadikan Py-GC-MS sangat penting dalam studi nanoplastik yang sulit dianalisis dengan metode mikroskopi. Namun demikian, metode ini tidak memberikan informasi mengenai jumlah partikel maupun ukuran partikel, melainkan hanya massa dari masing-masing jenis polimer. Oleh karena itu, teknik ini sering dikombinasikan dengan metode lain seperti mikroskopi FTIR dan spektroskopi Raman, yang masing-masing memungkinkan identifikasi partikel hingga ukuran sekitar 20 μm dan $\sim 1 \mu\text{m}$ dengan spesifisitas tinggi [37,47]. FTIR unggul dalam kecepatan analisis dan ketersediaan basis data spektrum, tetapi memiliki keterbatasan resolusi, sedangkan Raman menawarkan resolusi spasial yang lebih tinggi namun lebih lambat dan rentan terhadap gangguan fluoresensi.⁸⁶

Keterbatasan lain dari Py-GC-MS adalah kemungkinan tumpang tindih produk pirolisis apabila sampel mengandung campuran beberapa jenis polimer, sehingga dapat menyulitkan interpretasi hasil, meskipun teknik

analisis data lanjutan dapat membantu memisahkan kontribusi masing-masing polimer. Selain itu, metode ini bersifat destruktif, sehingga sampel tidak dapat dianalisis ulang, dan memerlukan kalibrasi yang cermat untuk menghubungkan sinyal yang diperoleh dengan massa polimer yang sebenarnya.⁴¹

Dalam praktiknya, Py-GC-MS dapat digunakan pada berbagai jenis matriks seperti debu klinik atau lumpur limbah dengan persiapan minimal, seperti pengeringan atau proses pencernaan kimia untuk menghilangkan bahan organik non-plastik. Umumnya, dilakukan tahap digestasi kimia dan filtrasi terlebih dahulu untuk memusatkan partikel plastik sebelum proses pirolisis.⁷³

Dari segi biaya dan *throughput*, perangkat Py-GC-MS yang dilengkapi unit piroliser tergolong mahal dan umumnya tersedia di laboratorium kimia analitik khusus. Setiap analisis memerlukan waktu sekitar 30–60 menit, sehingga kapasitasnya berkisar puluhan sampel per hari. Metode ini sangat berguna untuk menjawab pertanyaan kuantitatif secara umum, seperti jumlah plastik yang dihasilkan dari suatu prosedur, namun untuk identifikasi partikel secara individual, tetap perlu dikombinasikan dengan metode berbasis mikroskopi.⁴¹

6. TRANSMISSION ELECTRON MICROSCOPY (TEM)

Transmission Electron Microscopy (TEM) merupakan teknik pencitraan beresolusi sangat tinggi yang didasarkan pada interaksi antara berkas elektron dan sampel.²⁶ Metode ini memungkinkan visualisasi morfologi sampel secara detail, termasuk verifikasi ukuran serta bentuk partikel, seperti karakteristik sferisnya.^{71,72} Dalam konteks deteksi mikroplastik, TEM lebih sering digunakan dalam penelitian yang mengevaluasi efek partikel plastik pada sistem model.

Sebagai contoh, TEM dimanfaatkan untuk mengkaji efek toksik nano- dan mikroplastik polistirena terhadap bakteri laut *Halomonas alkaliphile*.⁶⁹ Pada penelitian lain, karakterisasi menggunakan TEM dilakukan untuk menilai pengaruh mikroplastik berbahan polipropilena (PP), polietilena (PE), polietilena tereftalat (PET), dan polivinil klorida (PVC) terhadap mikroalga.¹²⁶

Hasil menarik juga diperoleh dalam studi interaksi antara mikroplastik PET dan PP berfluoresensi dengan ubur-ubur *Cassiopea andromeda*. Meskipun demikian, penggunaan TEM dalam deteksi langsung mikroplastik memiliki keterbatasan. Hal ini disebabkan oleh sifat polimer yang umumnya amorf dan memiliki komposisi unsur sederhana, sehingga interaksinya dengan elektron relatif lemah dan menghasilkan kontras citra yang rendah. Untuk mengatasi hal tersebut, penggunaan pewarnaan logam berat (*heavy-metal staining*) dapat dilakukan guna meningkatkan efisiensi deteksi.¹²⁶

Selain itu, TEM memiliki batasan terkait ketebalan sampel yang dapat dianalisis secara optimal.^{56,85} Teknik ini juga tidak cocok untuk pengukuran konsentrasi berbasis massa secara akurat. Proses preparasi sampel, khususnya penguapan pelarut, dapat menyebabkan agregasi partikel pada grid, yang berpotensi menghasilkan interpretasi yang keliru, seperti partikel besar yang menutupi partikel yang lebih kecil. Meskipun demikian, TEM tetap dapat dikombinasikan dengan analisis unsur untuk memberikan informasi kualitatif mengenai komposisi kimia partikel. Oleh karena itu, TEM sering digunakan sebagai bagian dari pendekatan multi-metode untuk memperoleh gambaran yang lebih komprehensif mengenai mikroplastik yang diteliti.¹²⁶

7. ATOMIC FORCE MICROSCOPY (AFM)

Atomic Force Microscopy (AFM) merupakan teknik mikroskopi dengan sensitivitas tinggi yang digunakan untuk menganalisis topografi permukaan dan tingkat kekasaran suatu material. Serupa dengan SEM, metode ini banyak digunakan dalam studi biodegradasi polimer sintesis karena mampu menggambarkan perubahan permukaan akibat aktivitas mikroorganisme secara jelas. Pada citra AFM, peningkatan kekasaran permukaan serta terbentuknya lubang (*pits*) dan retakan dapat diamati seiring berlangsungnya proses degradasi.¹²⁶

Sebagai contoh, dalam penelitian oleh Fang dan kolega, AFM digunakan untuk menunjukkan degradasi serta perubahan permukaan mikroplastik berbahan PP dan PE akibat aktivitas bakteri yang berasal dari ekosistem mangrove. Hasil yang diperoleh melalui AFM menunjukkan kesesuaian dengan temuan dari metode lain seperti SEM dan FTIR, sehingga menegaskan peran AFM dalam mengonfirmasi proses degradasi.¹²⁶

Teknik ini memiliki beberapa keunggulan, antara lain resolusi tinggi dan kebutuhan preparasi sampel yang relatif minimal. Berbeda dengan metode mikroskop elektron seperti SEM atau TEM, AFM tidak memerlukan pelapisan konduktif maupun prosedur preparasi yang kompleks. Dari segi efisiensi waktu, AFM relatif cepat untuk analisis area kecil. Namun, untuk pencitraan permukaan dalam skala luas, proses pemindaian yang dilakukan titik demi titik dapat menjadi cukup memakan waktu.¹²⁶

8. XPS

X-Ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) merupakan teknik analisis permukaan yang sangat sensitif untuk

menentukan komposisi unsur dan keadaan ikatan kimia pada lapisan terluar suatu material melalui analisis elektron yang dipancarkan. Dalam penelitian mikroplastik, XPS menjadi salah satu pendekatan modern yang digunakan untuk memahami karakter kimia permukaan partikel, termasuk rasio unsur seperti karbon terhadap oksigen atau fluor, yang dapat membantu mengidentifikasi jenis polimer. Teknik ini umumnya digunakan bersama metode lain seperti FTIR dan mikroskopi untuk memperoleh gambaran yang lebih komprehensif. XPS juga telah diaplikasikan pada berbagai sampel lingkungan, termasuk mikroplastik dari kantong teh, serta untuk menganalisis interaksi mikroplastik dengan kontaminan seperti logam berat. Selain itu, teknik ini mampu mendeteksi perubahan kimia permukaan akibat degradasi atau penuaan material, misalnya pada polietilena, polipropilena, dan PVC yang menunjukkan perubahan kandungan oksigen atau pelemahan ikatan kimia tertentu setelah proses paparan lingkungan. Meskipun demikian, keterbatasan utama XPS adalah analisisnya yang hanya mencakup lapisan permukaan paling luar, sehingga tidak mencerminkan komposisi keseluruhan material. Selain itu, sensitivitas terhadap partikel berukuran sangat kecil seperti nanoplastik juga terbatas, sehingga hasil dapat dipengaruhi oleh kondisi preparasi sampel.¹²⁷

9. X-RAY DIFFRACTION (XRD)

X-Ray Diffraction (XRD) digunakan untuk mengidentifikasi struktur kristal suatu material, termasuk ukuran kristalit dan tingkat regangan internal. Dalam studi mikroplastik, pola difraksi yang dihasilkan dapat berfungsi sebagai “sidik jari” material untuk membantu proses identifikasi polimer. Selain itu, XRD berperan dalam memahami sifat kristalinitas mikroplastik serta perubahan

struktural akibat paparan lingkungan. Informasi ini penting dalam menilai interaksi mikroplastik dengan sedimen, mineral, maupun komponen lingkungan lainnya. XRD juga sering digunakan untuk mengevaluasi perubahan struktur akibat proses biodegradasi. Namun demikian, perubahan tingkat kristalinitas tidak selalu berkorelasi langsung dengan laju degradasi polimer, sehingga interpretasinya harus dilakukan secara hati-hati. Sebagai contoh, beberapa jenis polimer dapat menunjukkan penurunan kristalinitas yang berbeda meskipun mengalami kehilangan massa yang serupa, atau bahkan tidak menunjukkan perubahan signifikan meskipun terjadi degradasi. Hal ini berkaitan dengan perbedaan struktur molekuler masing-masing polimer. Oleh karena itu, XRD sebaiknya digunakan sebagai metode pendukung, bukan sebagai satu-satunya indikator dalam analisis degradasi mikroplastik.¹²⁸

10. CARA LAIN

Berbagai teknik tambahan untuk deteksi mikroplastik dan nanoplastik terus berkembang, meskipun belum menjadi metode rutin dalam penelitian kedokteran gigi. Untuk analisis nanoplastik dalam fase cair, metode seperti *dynamic light scattering* (DLS) dan *nanoparticle tracking analysis* (NTA) dapat digunakan untuk memperkirakan distribusi ukuran partikel hingga skala ratusan nanometer. Namun, kedua metode ini tidak mampu mengidentifikasi komposisi polimer dan rentan terhadap gangguan akibat heterogenitas sampel.⁵³

Selain itu, metode hibrida canggih seperti *atomic force microscopy–infrared spectroscopy* (AFM-IR) memungkinkan pengukuran spektrum kimia secara langsung pada partikel berukuran nano. Teknik berbasis laser seperti *matrix-assisted laser desorption/ionization time-of-flight* (MALDI-ToF) spektrometri

massa juga mulai dieksplorasi untuk identifikasi nanoplastik. Meskipun menjanjikan, metode-metode lanjutan ini masih memerlukan pengembangan lebih lanjut agar dapat diaplikasikan secara efektif pada sampel dunia nyata, serta hingga saat ini belum banyak digunakan dalam literatur material kedokteran gigi.

Dalam penerapan berbagai metode ini pada bidang kedokteran gigi, peneliti umumnya perlu mengombinasikan beberapa pendekatan analisis. Sebagai contoh, untuk mempelajari partikel yang dihasilkan selama proses penggerindaan komposit, debris dapat dikumpulkan pada suatu filter, kemudian dianalisis menggunakan mikroskop elektron pemindai (SEM) untuk mengamati morfologi serta distribusi ukuran partikel. Selanjutnya, teknik spektroskopi seperti μ FTIR atau Raman dapat digunakan pada partikel terpilih untuk mengidentifikasi komposisi polimernya.⁴¹

Dalam konteks penilaian paparan pada manusia, seperti tertelannya partikel oleh pasien atau terhirupnya oleh tenaga medis, metode Py-GC-MS dapat digunakan untuk mengukur total jumlah polimer yang terpapar, sementara teknik mikroskopi berperan dalam menentukan ukuran partikel yang berpotensi terdeposit pada organ tertentu. Setiap metode memiliki keterbatasan yang perlu diperhatikan. Teknik spektroskopi dapat gagal mendeteksi partikel berwarna gelap atau berbentuk tidak beraturan, sedangkan SEM berpotensi menghitung partikel non-plastik, seperti serat debu, sebagai mikroplastik apabila tidak divalidasi dengan analisis spektroskopi.⁴¹

Oleh karena itu, pengendalian kualitas analitik menjadi sangat penting, termasuk penggunaan sampel kontrol kosong (*blank*) untuk mencegah kontaminasi dari mikroplastik lingkungan yang sangat umum ditemukan. Tantangan dalam memperoleh bukti ilmiah yang kuat

sebagian disebabkan oleh kompleksitas dalam mendeteksi mikroplastik pada kadar jejak, yang memerlukan teknik analisis dengan sensitivitas tinggi. Meskipun perkembangan teknologi deteksi, seperti sensor nanoplastik yang lebih canggih dan sistem pencitraan berkapasitas tinggi, terus meningkatkan kemampuan analisis, metode yang tersedia saat ini masih memiliki keterbatasan yang signifikan.⁴¹

Pra-perlakuan yang tepat diperlukan untuk menghilangkan bahan organik sebelum proses analisis. Sampel umumnya memerlukan tahap digestasi untuk menguraikan material biologis, seperti saliva dan sel, tanpa merusak partikel plastik yang terkandung di dalamnya. Metode yang umum digunakan meliputi penggunaan bahan kimia oksidatif, seperti hidrogen peroksida atau reagen Fenton, serta enzim seperti proteinase K dan lipase. Pendekatan ini efektif dalam menguraikan protein, lipid, dan komponen organik lainnya, sementara sebagian besar plastik tetap utuh.¹¹¹

Dalam konteks material kedokteran gigi, terdapat tantangan khusus yang perlu diperhatikan. Abrasif berbasis silika dalam pasta gigi serta bahan pengisi kalsium-fosfat dalam komposit dapat mengganggu spektrum inframerah, sehingga diperlukan teknik tambahan seperti pelarutan selektif atau ultrafiltrasi menggunakan membran berukuran 0,2–10 μm . Sementara itu, aerosol dan debu yang dihasilkan di area klinis umumnya dikumpulkan secara langsung menggunakan filter polikarbonat untuk keperluan analisis mikroskopi.¹¹²

Untuk meminimalkan kontaminasi silang, peneliti menekankan pentingnya penerapan protokol kerja bersih (*clean-bench*), serta penggunaan peralatan laboratorium berbahan kaca atau logam sebagai pengganti plastik.¹¹³

BAB 4

RESIN AKRILIK DAN RESIN KOMPOSIT

A. RESIN AKRILIK

Resin akrilik merupakan salah satu bahan yang semakin banyak digunakan dalam kedokteran gigi, khususnya dalam bidang prostodonsia, ortodonti, dan rehabilitasi maksilofasial. Dalam praktik klinis sehari-hari, material ini banyak digunakan sebagai bahan dasar pembuatan basis gigi tiruan, alat ortodonti lepasan, mahkota sementara, serta prosedur *relining* pada gigi tiruan. Basis gigi tiruan berbahan resin akrilik mencakup berbagai jenis, mulai dari gigi tiruan sebagian lepasan, gigi tiruan lengkap, hingga gigi tiruan sebagian lepasan yang didukung implan. Sementara itu, pada bidang ortodonti, resin akrilik digunakan dalam piranti lepasan yang berfungsi untuk ekspansi lengkung rahang maupun sebagai *space maintainer*.^{1,132-134}

Penggunaan resin akrilik sebagai mahkota sementara memiliki peran penting dalam melindungi gigi setelah preparasi sambil menunggu pembuatan mahkota definitif. Selain itu, prosedur relining pada gigi tiruan dengan bahan ini dapat meningkatkan retensi, stabilitas, serta dukungan terhadap jaringan sekitarnya.^{1,135} Secara umum, jenis resin akrilik yang

paling banyak digunakan adalah polimetil metakrilat (PMMA), yang dikenal memiliki berbagai keunggulan seperti biokompatibilitas yang baik, kemudahan dalam proses manipulasi, kestabilan dalam rongga mulut, nilai estetika yang memadai, serta biaya yang relatif ekonomis.¹³⁶

Dalam penggunaannya, resin akrilik dapat bertahan di dalam rongga mulut dalam jangka waktu yang cukup lama, dengan rata-rata sekitar lima tahun.⁷⁹⁻⁸² Selama periode tersebut, bahan ini terus-menerus terpapar berbagai faktor lingkungan oral, seperti perubahan suhu, variasi pH, serta paparan makanan dan minuman. Kondisi ini dapat memicu proses degradasi dan keausan material secara bertahap.¹³⁷

Meskipun memiliki berbagai keunggulan, resin akrilik tidak sepenuhnya bebas dari risiko. Proses polimerisasi yang tidak sempurna dapat meninggalkan residu monomer serta produk samping yang berpotensi menimbulkan efek biologis yang merugikan. Komponen yang terlepas dari resin akrilik dapat berdifusi ke dalam saliva, kemudian berinteraksi dengan jaringan rongga mulut, bahkan berpotensi terserap melalui mukosa oral, saluran pencernaan, kulit, maupun sistem pernapasan.¹³⁸

Secara umum, resin akrilik dianggap sebagai bahan yang *biologically acceptable*, namun berbagai penelitian menunjukkan potensi terjadinya efek samping, baik lokal maupun sistemik. Efek lokal yang paling sering dilaporkan meliputi reaksi alergi, kandidiasis, cheilitis, stomatitis, serta iritasi pada jaringan. Sementara itu, efek sistemik seperti gangguan pada sistem pernapasan dan pencernaan dilaporkan lebih jarang terjadi.⁹⁶

Meskipun demikian, paparan jangka panjang terhadap material ini, termasuk kemungkinan masuknya zat toksik ke dalam tubuh, tetap perlu mendapat perhatian khusus agar tidak menimbulkan dampak merugikan di kemudian hari.

Seiring dengan berkembangnya ilmu pengetahuan, berbagai upaya dilakukan untuk meningkatkan kualitas resin akrilik, salah satunya melalui pemanfaatan nanoteknologi. Penambahan nanopartikel ke dalam resin akrilik bertujuan untuk memperbaiki sifat mekanis, meningkatkan ketahanan terhadap fraktur, serta memberikan efek antimikroba tanpa mengurangi nilai estetika.¹³⁹ Nanoteknologi memungkinkan penggunaan *nano-fillers*, pelapisan, maupun impregnasi untuk meningkatkan performa material ini.¹⁴⁰ Berbagai jenis nanopartikel seperti perak (Ag), titanium dioksida (TiO₂), zirkonia (ZrO₂), silika (SiO₂), dan graphene oxide (GO) telah banyak diteliti karena kemampuannya dalam meningkatkan karakteristik struktural dan biologis resin akrilik.¹⁴¹

Dari sisi mekanis, penambahan nanopartikel seperti zirkonia dan silika terbukti dapat meningkatkan kekuatan lentur dan ketangguhan terhadap fraktur, sehingga memperpanjang umur pakai alat prostetik.^{142,143} Hal ini berkaitan dengan meningkatnya ikatan silang dalam struktur polimer serta berkurangnya porositas material.⁵⁸ Selain itu, penambahan nanopartikel antimikroba seperti perak, titanium dioksida, dan zinc oxide juga terbukti mampu menghambat adhesi mikroorganisme, termasuk *Candida albicans* dan *Streptococcus mutans*, yang sering menjadi penyebab stomatitis gigi tiruan dan karies sekunder.^{144,145}

Namun demikian, penggunaan nanopartikel juga menimbulkan kekhawatiran terkait potensi efek sitotoksik.⁶¹ Beberapa nanopartikel diketahui dapat memicu stres oksidatif dan respons inflamasi yang berpotensi merusak jaringan di sekitarnya. Walaupun hasil penelitian *in vitro* menunjukkan manfaat yang menjanjikan, relevansi klinisnya masih perlu dibuktikan lebih lanjut melalui penelitian *in vivo*.^{146,147}

Dari segi estetika, resin akrilik juga dapat mengalami perubahan warna dan degradasi permukaan akibat paparan

cairan oral, zat pewarna, dan keausan mekanis dalam jangka panjang.^{148,149} Penambahan nanopartikel seperti titanium dioksida dan silika telah terbukti mampu meningkatkan stabilitas warna, mempertahankan kilap, serta memperhalus permukaan bahan.¹⁵⁴ Dengan demikian, kualitas estetika dan daya tahan restorasi dapat lebih terjaga dalam jangka panjang.

Meskipun berbagai inovasi telah dilakukan, penerapan hasil penelitian laboratorium ke dalam praktik klinis masih menjadi tantangan. Oleh karena itu, diperlukan lebih banyak penelitian *in vivo* untuk mengevaluasi kompatibilitas jaringan, perilaku degradasi, serta potensi respons imun terhadap bahan ini secara lebih akurat.¹¹⁵⁻¹⁵⁷ Dengan pemahaman yang lebih komprehensif, penggunaan resin akrilik dalam kedokteran gigi diharapkan dapat terus berkembang dengan mempertimbangkan aspek keamanan, efektivitas, dan keberlanjutan.

Dalam upaya mengatasi gangguan fungsi dan estetika akibat kehilangan gigi alami, berbagai jenis bahan telah dikembangkan dan digunakan dalam pembuatan restorasi gigi. Produksi polimer sintesis yang dimulai pada akhir abad ke-19 hingga awal abad ke-20 merupakan suatu terobosan besar dalam bidang bioteknologi. Pada dekade 1940-an, poli(metil metakrilat) (PMMA) telah menjadi bahan pilihan utama untuk sekitar 60% pembuatan gigi tiruan lepasan di pasar Amerika. Meskipun telah diperkenalkan dalam dunia kedokteran gigi hampir satu abad yang lalu, polimer akrilat hingga saat ini masih dianggap tidak tergantikan dalam berbagai aplikasinya. Polimer ini bersifat transparan, mudah dibentuk dan diwarnai, serta mampu meniru secara akurat jaringan yang hilang seperti gigi, gingiva, dan kulit.¹⁵⁸

Penggunaan luas polimer akrilat dalam kedokteran gigi tidak terlepas dari sifat mekanis dan fisiknya yang optimal, seperti kekuatan, kekerasan, stabilitas dimensi, ketahanan

terhadap abrasi, serta rendahnya kelarutan dan penyerapan air. Selain itu, bahan ini juga memiliki stabilitas kimia yang baik, tingkat biokompatibilitas yang memadai, karakteristik estetika yang baik dengan warna yang tahan lama, tidak berbau dan tidak berasa, mudah diproses dan diperbaiki, serta relatif ekonomis.^{159,160}

Namun demikian, di balik berbagai keunggulan tersebut, polimer akrilat juga memiliki sejumlah keterbatasan, seperti risiko fraktur pada gigi tiruan akibat penyerapan air, serta kekuatan impak dan kekuatan lentur yang relatif rendah.¹⁶¹ Perkembangan teknologi modern memberikan peluang untuk meningkatkan berbagai sifat akrilat agar dapat memenuhi tuntutan klinis yang semakin kompleks.

Salah satu aspek yang perlu mendapatkan perhatian khusus adalah peningkatan karakteristik biologis polimer akrilat. Hal ini berkaitan dengan adanya laporan mengenai reaksi merugikan, baik pada pasien maupun tenaga kesehatan gigi, yang disebabkan oleh pelepasan zat-zat yang berpotensi toksik selama proses pembuatan maupun penggunaan bahan tersebut.¹⁶² Oleh karena itu, berbagai upaya dilakukan untuk meningkatkan keamanan biologis material ini, salah satunya melalui penambahan agen biosidal pada bahan yang berkontak langsung dengan jaringan. Pendekatan ini diharapkan dapat meningkatkan sifat biologis material sekaligus menurunkan risiko infeksi di dalam rongga mulut.

Dengan demikian, pembahasan mengenai polimer akrilat tidak hanya mencakup karakteristik dasar dan penggunaannya yang luas dalam praktik kedokteran gigi, tetapi juga mencakup berbagai upaya pengembangan untuk meningkatkan sifat mekanis, fisik, dan biologisnya, sehingga dapat memberikan hasil perawatan yang lebih optimal dan aman bagi pasien.¹⁶³

B. RESIN KOMPOSIT

Resin komposit merupakan bahan restorasi yang digunakan dalam perawatan gigi untuk memperbaiki struktur gigi yang rusak. Peningkatan sifat mekanik pada resin komposit menyebabkan indikasi penggunaannya semakin luas. Pada awalnya, restorasi gigi posterior umumnya dilakukan menggunakan bahan amalgam. Namun, seiring dengan perkembangan resin komposit, baik dari segi kekuatan maupun estetika, penggunaan amalgam menjadi semakin terbatas.

Resin komposit dikenal sebagai bahan restorasi sewarna gigi, dan pada tahun 1990 dilaporkan bahwa tingkat keberhasilan restorasi resin komposit pada gigi posterior setara dengan amalgam. Hal ini mendorong peningkatan penggunaan resin komposit dalam berbagai prosedur restorasi gigi.^{15,164}

Berdasarkan hasil studi, diasumsikan bahwa rata-rata restorasi resin komposit dapat bertahan di dalam rongga mulut selama sekitar 6 tahun.¹⁰⁻¹² Penggunaan resin komposit pada gigi posterior juga dipengaruhi oleh berbagai gaya mekanik serta perubahan kondisi kimia, seperti saat proses mengunyah makanan dan kebiasaan bruxism. Apabila gaya yang bekerja pada resin komposit melebihi batas toleransi material, maka dapat terjadi keausan pada restorasi tersebut.^{15,165}

Keausan menjadi semakin diperhatikan seiring meningkatnya penggunaan resin komposit sebagai bahan restorasi pada gigi posterior, karena keausan merupakan salah satu faktor penyebab kegagalan restorasi tersebut.¹⁶⁶ Proses degradasi material dapat menyebabkan terlepasnya komponen resin komposit ke dalam rongga mulut. Substansi yang terlepas tersebut diduga dapat memengaruhi pertumbuhan sel serta respons imun fibroblas gingiva. Selain itu, studi juga melaporkan bahwa partikel resin komposit yang terdeposit di paru-paru kelinci dapat memicu terjadinya inflamasi kronis.⁶¹

Komposit berbasis resin (*resin-based composites* atau RBCs) telah menjadi salah satu bahan restoratif yang paling banyak digunakan dalam kedokteran gigi. Hal ini disebabkan oleh keunggulannya dalam aspek estetika, sifat material, biaya yang relatif terjangkau, fleksibilitas penggunaan, serta performa klinis yang dapat diterima. Meskipun demikian, masih terdapat ruang untuk perbaikan, terutama terkait umur pakai klinis yang belum sepenuhnya optimal. Terlepas dari keterbatasan tersebut, tidak dapat disangkal bahwa pengembangan awal dan penyempurnaan lanjutan dari material ini telah merevolusi praktik kedokteran gigi modern.¹⁶⁷

Sebelum ditemukannya komposit sebagai bahan restoratif, perawatan estetik dalam kedokteran gigi umumnya terbatas pada regio anterior. Pada awalnya digunakan semen silikat, kemudian pada awal tahun 1950-an berkembang penggunaan resin polimetil metakrilat (PMMA), yang terdiri dari bubuk PMMA pra-polimerisasi yang dicampur dengan monomer cair metil metakrilat (MMA). Proses pengerasan material ini terjadi melalui reaksi amina-peroksida yang dikembangkan oleh peneliti Jerman pada tahun 1940-an.¹⁶⁸

Namun, material tersebut memiliki berbagai kelemahan, di antaranya perubahan warna dan pewarnaan marginal akibat tingginya penyusutan polimerisasi, tidak adanya kemampuan adhesi terhadap struktur gigi, serta perbedaan koefisien ekspansi termal yang signifikan dibandingkan dengan jaringan gigi. Selain itu, toksisitas monomer MMA juga dapat menimbulkan reaksi pada pulpa. Secara mekanis, bahan ini juga relatif lemah sehingga penggunaannya menjadi terbatas.¹⁶⁸

Berbagai upaya awal dilakukan untuk memperbaiki sifat material ini, salah satunya dengan menambahkan pengisi anorganik ke dalam bubuk resin untuk menurunkan koefisien ekspansi termal serta mengurangi penyusutan dan penyerapan

air. Namun, hasil yang diperoleh masih belum memadai, sehingga diperlukan pengembangan material yang lebih baik.¹⁶⁸

Langkah penting dalam perkembangan ini dilakukan oleh Dr. Rafael Bowen, yang mencoba memperkenalkan resin epoksi yang diisi dengan partikel kuarsa fusi. Meskipun resin epoksi memiliki kemampuan adhesi yang baik terhadap berbagai permukaan, material ini tidak dapat mengeras dengan baik dalam kondisi lembap, dan bahan kimia yang digunakan untuk mempercepat polimerisasi cenderung bersifat iritatif terhadap jaringan.¹⁶⁸

Penelitian lanjutan oleh Dr. Bowen menghasilkan molekul hibrida yang terbentuk dari reaksi antara metakrilat dan epoksida, yang kemudian dikenal sebagai monomer Bis-GMA (bisphenol A glycidyl methacrylate), atau sering disebut sebagai resin Bowen. Penemuan ini dipatenkan di Amerika Serikat pada tahun 1962 dan mulai diperkenalkan dalam literatur kedokteran gigi pada tahun 1963. Inovasi ini menjadi tonggak penting yang membuka jalan bagi pengembangan komposit resin modern.¹⁶⁸

Dibandingkan dengan bahan akrilik yang digunakan sebelumnya, komposit baru ini memiliki kekuatan dan kekakuan yang lebih baik, penyusutan polimerisasi yang lebih rendah, koefisien ekspansi termal yang lebih mendekati jaringan gigi, serta hasil estetika yang lebih unggul. Selain itu, perkembangan teknik etsa asam (acid etch technique) pada email oleh Dr. Michael Buonocore juga berperan besar dalam keberhasilan penggunaan komposit. Teknik etsa menggunakan asam fosfat memungkinkan terjadinya adhesi mekanis antara bahan restoratif dan permukaan email, sehingga menghasilkan penutupan marginal yang lebih baik dan stabil.¹⁶⁸

Pada tahap awal, penggunaan komposit resin terutama terbatas pada restorasi anterior yang menekankan aspek estetika, sementara restorasi posterior masih didominasi oleh

penggunaan amalgam. Namun, seiring dengan perkembangan teknologi material dan sistem adhesi, penggunaan komposit resin terus meluas hingga mencakup berbagai indikasi klinis dalam kedokteran gigi modern.

BAB 5

MIKROPLASTIK DALAM SAMPEL: IDENTIFIKASI DAN PENGUKURAN

Resin komposit dan resin akrilik dibuat dalam bentuk sampel berukuran 10 mm × 10 mm dengan ketebalan 3 mm. Masing-masing jenis material disiapkan sebanyak 9 sampel. Selanjutnya, seluruh sampel tersebut dibagi menjadi tiga kelompok perlakuan, yaitu 3 sampel untuk perlakuan penyikatan, 3 sampel untuk perlakuan perubahan suhu, dan 3 sampel untuk perlakuan variasi pH.

1. PERLAKUAN PENYIKATAN

Dilakukan proses *mounting* sampel resin akrilik dan resin komposit, masing-masing sebanyak 3 sampel, menggunakan dental stone di dalam beaker glass. Selanjutnya, ditambahkan saliva buatan sebanyak 10 mL ke dalam masing-masing beaker glass tersebut.

2. PERLAKUAN SUHU

Ketiga sampel resin akrilik dan resin komposit dimasukkan ke dalam beaker glass, kemudian ditambahkan saliva buatan sebanyak 10 mL ke dalam masing-masing wadah tersebut.

3. PERLAKUAN PH

Ketiga sampel resin akrilik dan resin komposit dimasukkan ke dalam beaker glass untuk selanjutnya dilakukan tahapan perlakuan sesuai prosedur penelitian.

4. KONTROL POSITIF

Resin komposit dan resin akrilik dibuat dalam ukuran 10 mm × 10 mm dengan ketebalan 3 mm. Selanjutnya, sampel resin akrilik dan resin komposit dilakukan *scraping* menggunakan pisau kecil (blade). Partikel yang diperoleh kemudian dimasukkan ke dalam beaker glass, kemudian ditambahkan saliva buatan sebanyak 10 mL.¹⁶⁹

5. KONTROL NEGATIF

a. Perlakuan penyikatan

Dilakukan *mounting* tanpa sampel resin akrilik dan resin komposit menggunakan dental stone ke dalam beaker glass sebagai kontrol negatif, kemudian ditambahkan saliva buatan sebanyak 10 mL.

b. Perlakuan suhu

Dimasukkan saliva buatan ke dalam beaker glass sebanyak 10 mL tanpa penambahan sampel resin akrilik maupun resin komposit.

c. Perlakuan pH

Dimasukkan saliva buatan ke dalam beaker glass sebanyak 10 mL tanpa penambahan sampel resin akrilik maupun resin komposit.

6. PERLAKUAN PENYIKATAN

- a. Sikat gigi elektrik dipasang pada ketiga sampel resin akrilik dan resin komposit yang telah disiapkan.
- b. Sikat gigi elektrik juga dipasang pada sampel kontrol negatif.
- c. Kemudian, sikat gigi elektrik dioperasikan selama 120 jam.

7. PERLAKUAN SUHU

- a. Ketiga sampel resin akrilik dan resin komposit yang telah disiapkan dimasukkan ke dalam lemari pendingin pada suhu 5°C selama 60 jam.
- b. Sampel kontrol negatif juga dimasukkan ke dalam lemari pendingin pada suhu 5°C selama 60 jam.
- c. Setelah 60 jam, ketiga sampel resin akrilik dan resin komposit yang telah menjalani perlakuan suhu 5°C dipindahkan ke dalam inkubator untuk mendapatkan perlakuan suhu 55°C selama 60 jam.
- d. Sampel kontrol negatif kemudian ditempatkan pada suhu 55°C selama 60 jam.

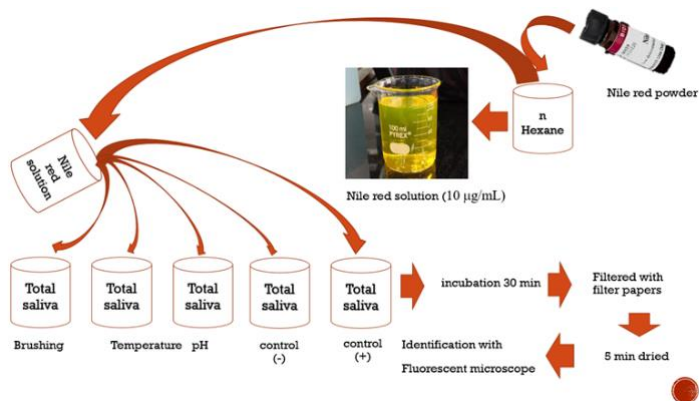
8. PERLAKUAN PH

- a. Buffer solution pH 4 dimasukkan ke dalam ketiga sampel resin akrilik dan resin komposit yang telah disiapkan dan dibiarkan selama 40 jam.
- b. Sampel kontrol negatif didiamkan selama 40 jam.

- c. Setelah 40 jam, masing-masing sampel resin akrilik dan resin komposit dipindahkan ke buffer solution pH 7 dan dibiarkan selama 80 jam.
- d. Sampel kontrol negatif kembali didiamkan selama 80 jam.

9. IDENTIFIKASI MIKROPLASTIK (GAMBAR 7)

- a. Setelah seluruh perlakuan selesai, semua saliva buatan dikumpulkan sesuai masing-masing kelompok perlakuan untuk dilakukan identifikasi mikroplastik. Selanjutnya, larutan *Nile red* diteteskan ke dalam saliva buatan tersebut dengan konsentrasi kerja 10 µg/mL menggunakan pelarut n-Hexane, kemudian diinkubasi selama 30 menit.
- b. Setelah inkubasi selesai, campuran saliva buatan dan *Nile red* disaring menggunakan kertas saring.
- c. Kertas saring kemudian didiamkan selama ±5 menit hingga kering.
- d. Identifikasi mikroplastik dilakukan menggunakan mikroskop fluoresen.



Gambar 7. Prosedur penggunaan nile red.

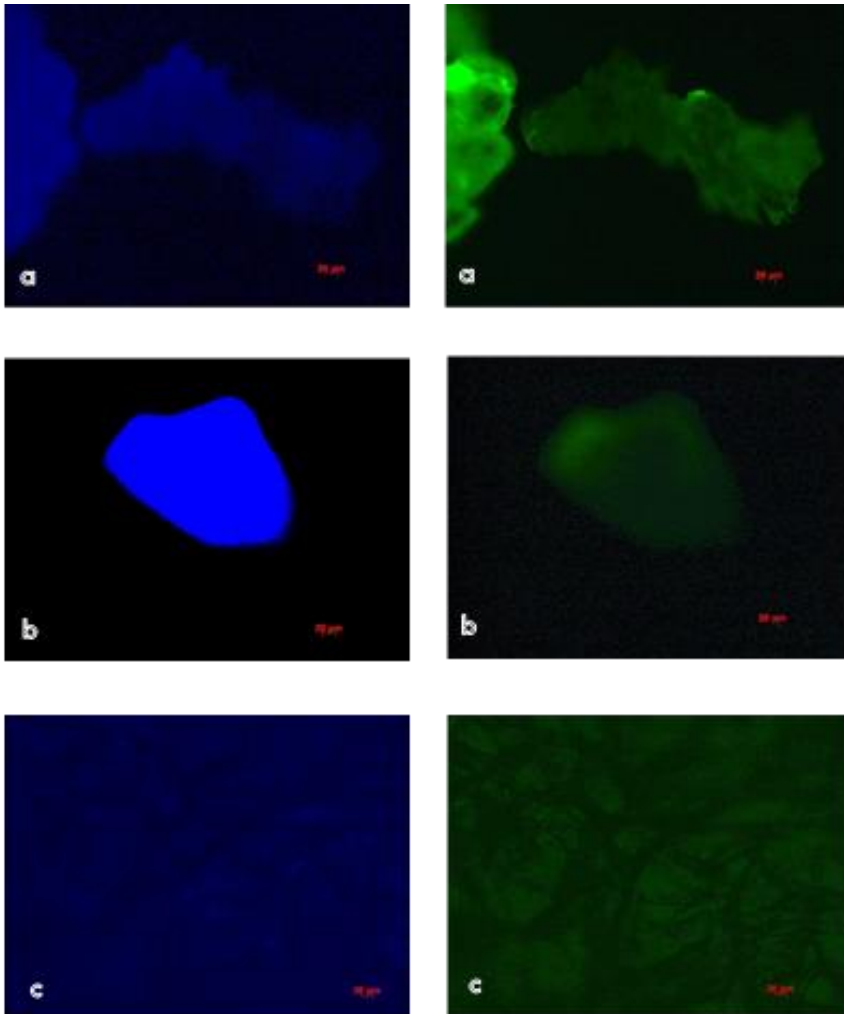
A. IDENTIFIKASI MIKROPLASTIK

Identifikasi mikropplastik dilakukan menggunakan mikroskop fluoresen dengan *light filter* biru (excitation wavelength: 365 nm dan emission wavelength: 445 nm) serta *light filter* hijau (excitation wavelength: 450 nm dan emission wavelength: 515 nm). Tahap awal identifikasi dilakukan pada sampel kontrol positif dan kontrol negatif.

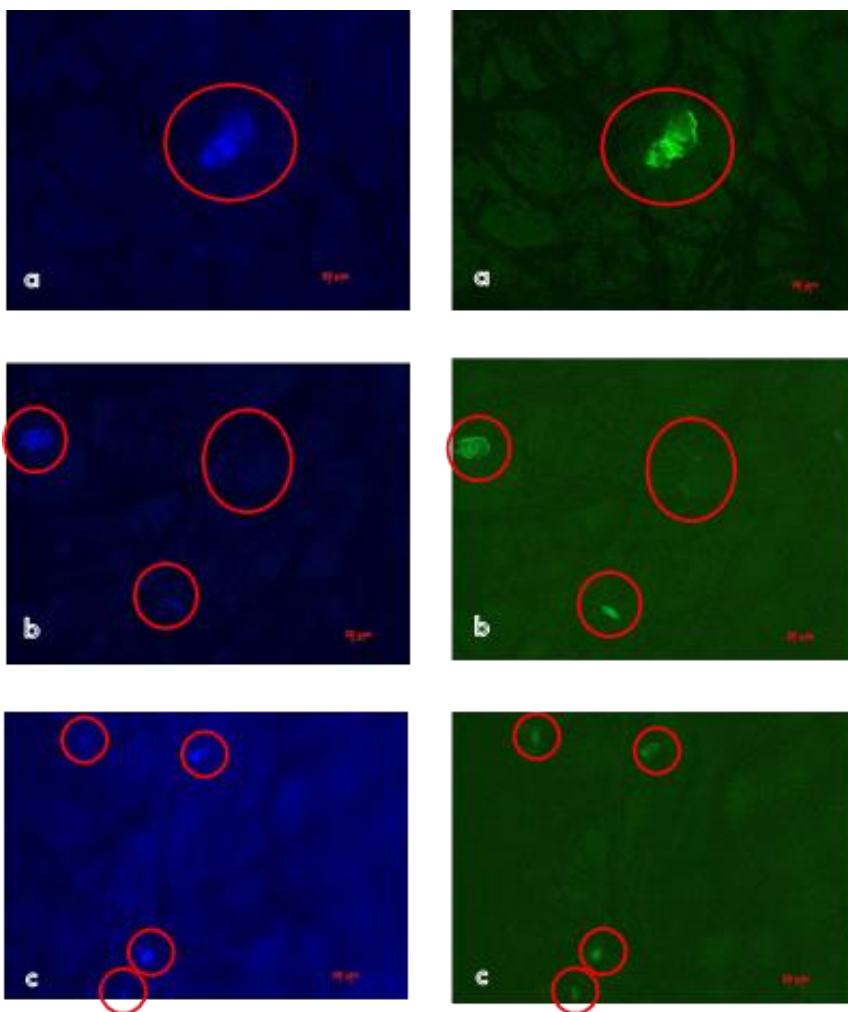
Kontrol positif berupa sampel resin akrilik dan resin komposit yang telah dilakukan *scraping* menggunakan blade, kemudian partikelnya dimasukkan ke dalam saliva buatan dan ditambahkan larutan *Nile red*. Sementara itu, kontrol negatif terdiri dari beberapa perlakuan, yaitu kontrol negatif penyikatan berupa wadah berisi saliva buatan yang mengalami penyikatan selama 10 hari tanpa penambahan sampel resin akrilik maupun resin komposit; kontrol negatif suhu berupa saliva buatan yang diberi perlakuan suhu 5°C selama 60 jam dan 55°C selama 60 jam; serta kontrol negatif pH berupa saliva buatan yang diberi perlakuan pH 4 selama 40 jam dan pH 7 selama 80 jam. Masing-masing kontrol negatif kemudian juga ditambahkan larutan *Nile red*.

Seluruh sampel kontrol positif dan kontrol negatif yang telah ditetesi *Nile red* diinkubasi selama 30 menit, kemudian disaring menggunakan kertas saring dan dikeringkan selama ± 5 menit. Setelah kering, kertas saring diamati menggunakan mikroskop fluoresen untuk identifikasi mikropplastik.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa mikropplastik teridentifikasi pada kontrol positif, sedangkan pada seluruh kontrol negatif tidak ditemukan mikropplastik (Gambar 8).



Gambar 8. Hasil identifikasi mikroplastik menggunakan mikroskop fluorezen light filters biru dan light filters hijau (a) pada kontrol positif resin akrilik, (b) pada kontrol positif resin komposit, dan (c) kontrol negatif.

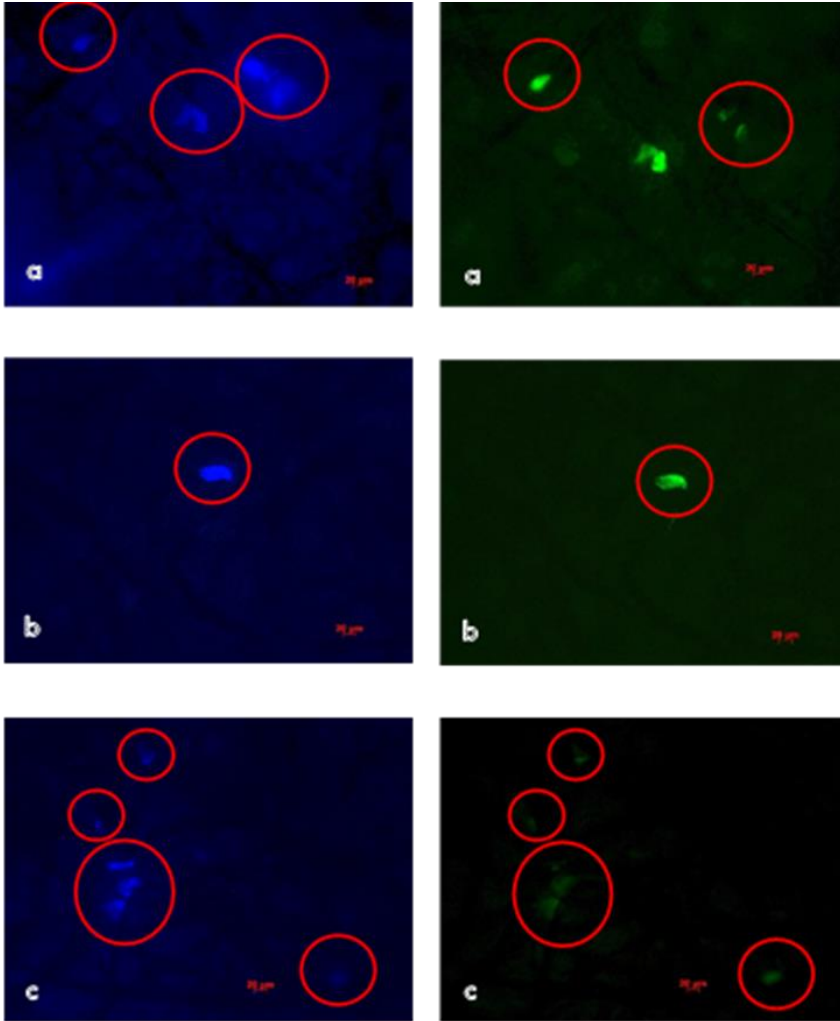


Gambar 9. Hasil identifikasi mikroplastik resin akrilik menggunakan mikroskop fluoresen light filters biru dan light filters hijau (a) pada perlakuan penyikatan, (b) pada perlakuan perubahan suhu, (c) pada perlakuan perubahan pH.

Identifikasi pada total saliva sampel resin akrilik dilakukan setelah seluruh perlakuan, yaitu penyikatan, perubahan suhu, dan perubahan pH, selesai dilaksanakan. Proses identifikasi dilakukan dengan mengamati keberadaan mikroplastik pada kertas saring menggunakan mikroskop

fluoresen. Hasil penelitian menunjukkan adanya mikroplastik pada total saliva buatan dari perlakuan penyikatan, perubahan suhu, dan perubahan pH pada resin akrilik (Gambar 9).

Perlakuan yang sama juga diterapkan pada total saliva dari sampel resin komposit setelah seluruh tahapan perlakuan penyikatan, suhu, dan pH selesai dilakukan untuk identifikasi mikroplastik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa mikroplastik juga ditemukan pada total saliva buatan dari masing-masing perlakuan resin komposit (Gambar 10).



Gambar 10. Hasil identifikasi mikroplastik resin komposit menggunakan mikroskop fluoresen light filters biru dan light filters hijau (a) pada perlakuan penyikatan, (b) pada perlakuan perubahan suhu, (c) pada perlakuan perubahan pH.

Resin akrilik dan resin komposit merupakan material yang mengandung komponen plastik.⁷ Kedua bahan ini dapat mengalami degradasi ketika terpapar berbagai faktor seperti penyikatan, perubahan suhu, dan variasi pH.^{62,64,87} Somacal dkk. menyatakan bahwa resin komposit yang mendapat

perlakuan penyikatan dan perubahan pH akan mengalami degradasi pada permukaannya.¹⁷⁰ Sementara itu, Ghavami-Lahiji dkk.¹⁷¹ serta Gonçalves dkk.¹⁷² melaporkan bahwa perlakuan suhu pada resin komposit dapat menyebabkan degradasi polimer akibat *hydrothermal aging*. Selain itu, Bettencourt dkk.¹⁷³ dan Szczesio-Wlodarczyk dkk.¹⁶ menjelaskan bahwa berbagai faktor seperti saliva, mastikasi, perubahan suhu, dan pH dapat menyebabkan degradasi pada resin akrilik serta pelepasan komponen berbahaya akibat proses tersebut.

Sejalan dengan pernyataan tersebut, hasil penelitian ini menunjukkan adanya penurunan massa pada resin akrilik dan resin komposit setelah perlakuan penyikatan, suhu, dan pH. Penurunan massa tersebut mengindikasikan bahwa kedua material mengalami degradasi, yang pada akhirnya dapat menghasilkan mikroplastik. Mikroplastik yang teridentifikasi dalam penelitian ini merupakan mikroplastik sekunder, yaitu partikel kecil yang terbentuk akibat keausan, abrasi, cabikan, kerusakan, maupun fragmentasi dari plastik berukuran lebih besar.^{59,60}

Identifikasi mikroplastik dalam penelitian ini dilakukan menggunakan pewarna fluoresen *Nile red*, dan hasilnya sejalan dengan penelitian Shim dkk. yang juga menggunakan *Nile red* serta mikroskop fluoresen untuk deteksi mikroplastik.¹⁷⁴ Meskipun mikroplastik dapat diamati menggunakan mikroskop biasa, metode tersebut memiliki reliabilitas yang rendah, terutama untuk partikel berukuran kecil, transparan, dan berbentuk serat.^{175,176}

Secara umum, mikroplastik berukuran mikron biasanya dianalisis menggunakan *Raman spectroscopy* dan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR). Namun, penggunaan kedua teknik tersebut sering memerlukan pengulangan untuk memperoleh hasil yang reliabel karena ukuran partikel yang

sangat kecil serta kondisi sampel yang basah, selain itu juga membutuhkan peralatan yang mahal dan waktu analisis yang relatif lama.^{170,172} Sebaliknya, pewarnaan menggunakan *Nile red* merupakan metode yang lebih sederhana dengan sensitivitas yang baik untuk identifikasi mikroplastik.²⁹ Gagné dkk. bahkan melaporkan bahwa *Nile red* mampu mendeteksi mikroplastik hingga ukuran nanopartikel 50–100 nm pada penelitian menggunakan polistirena transparan.¹²²

Perbedaan massa yang signifikan hanya ditemukan pada resin komposit dengan perlakuan penyikatan ($p < 0,05$) serta resin akrilik dengan perlakuan pH ($p < 0,05$). Perubahan massa tersebut menunjukkan bahwa kedua material mengalami degradasi, yang konsisten dengan penelitian sebelumnya yang melaporkan peningkatan kekasaran permukaan pada resin akrilik dan resin komposit setelah perlakuan penyikatan serta paparan pH ekstrem.^{16,63,177,178}

Dalam kondisi klinis, resin akrilik dan resin komposit yang berada di rongga mulut akan terus terpapar berbagai faktor seperti perubahan suhu akibat konsumsi makanan dan minuman, perubahan pH dari makanan, minuman, maupun obat-obatan, gaya mastikasi (gaya internal), serta penyikatan gigi (gaya eksternal). Kondisi tersebut dapat menyebabkan kerusakan matriks polimer, pelepasan monomer, keausan, erosi, dan degradasi permukaan material.¹⁷⁹ Perlakuan dalam penelitian ini diasumsikan setara dengan paparan selama 5 tahun di rongga mulut, sehingga diperkirakan material secara bertahap dapat melepaskan partikel mikroplastik ke dalam tubuh akibat proses degradasi yang berlangsung secara kontinu.

Paparan mikroplastik dalam kehidupan sehari-hari merupakan fenomena yang kian sulit dihindari, seiring meningkatnya penggunaan material berbasis polimer di berbagai aspek kehidupan, termasuk dalam bidang kedokteran gigi. Dalam konteks ini, material seperti resin akrilik dan resin

komposit menunjukkan adanya potensi pelepasan partikel mikroplastik ketika berada dalam kondisi yang menyerupai aktivitas rongga mulut, seperti penyikatan, perubahan suhu, dan fluktuasi pH. Secara umum, pelepasan tersebut memperlihatkan variasi jumlah yang dipengaruhi oleh jenis perlakuan, di mana masing-masing kondisi memberikan kontribusi berbeda terhadap dinamika degradasi material.

Di sisi lain, keberadaan mikroplastik tidak hanya bersumber dari material medis atau dental, tetapi juga telah teridentifikasi luas dalam berbagai bahan konsumsi sehari-hari. Mikroplastik ditemukan dalam produk seperti gula, garam, minuman beralkohol, hingga air minum dalam kemasan, menunjukkan bahwa paparan dapat terjadi melalui jalur konsumsi yang sangat umum. Selain itu, partikel mikroplastik juga dapat masuk ke dalam tubuh melalui udara yang terhirup, memperluas kemungkinan paparan dari lingkungan sekitar.

Akumulasi paparan dari berbagai sumber tersebut menggambarkan bahwa mikroplastik telah menjadi bagian dari realitas lingkungan modern yang tidak terpisahkan dari kehidupan manusia. Kondisi ini menuntut adanya perhatian yang lebih serius, baik dalam konteks penelitian maupun praktik, untuk memahami potensi risiko yang ditimbulkan terhadap kesehatan manusia dan keberlanjutan lingkungan. Dengan meningkatnya kesadaran akan isu ini, diharapkan muncul berbagai upaya inovatif dan kebijakan yang mampu meminimalkan paparan mikroplastik serta mengendalikan dampaknya secara lebih komprehensif.

Pengaruh mikroplastik resin akrilik dan resin komposit terhadap lingkungan dan kesehatan manusia belum diketahui. Namun, secara umum mikroplastik yang terkonsumsi ke dalam tubuh dapat menyebabkan inflamasi pada jaringan, proliferasi sel, terjadinya nekrosis, dan kompromi sel imun.⁹⁴ Yong dkk. menyatakan kurangnya data mengenai efek mikroplastik

terhadap manusia secara in vivo hingga saat ini, namun efek mikroplastik pada ikan dan tikus berupa inflamasi, stres oksidatif, dan perubahan metabolisme serta pada ikan mikroplastik menyebabkan perubahan pada otak.¹¹¹ Prietl dkk. menyatakan 20 nm mikroplastik toksik terhadap human monocytic cell line (U937) dan human monocytic cell line (THP-1) dan menstimulasi IL-8 serta menyebabkan peningkatan stres oksidatif pada THP-1.¹¹² Dong dkk. menyatakan mikroplastik menimbulkan efek sitotoksitas, stres oksidatif, dan respon inflamasi pada human lung epithelial cell (BEAS-2B) serta meningkatkan resiko terjadinya chronic obstructive pulmonary disease (COPD).¹¹³ Poma dkk. menyatakan mikroplastik dengan ukuran 100 nm pada 5-75 µg/mL dapat menstimulasi produksi reactive oxygen species (ROS), genotoksik, dan menyebabkan kerusakan DNA pada Human fibroblast cell (Hs27).¹⁸³

Terdapat beberapa limitasi yang dialami selama penelitian. diharapkan dapat diperbaiki pada penelitian yang akan datang. Limitasi pertama, kertas saring yang digunakan untuk identifikasi mikroplastik tidak sesuai dengan wadah kaca objek mikroskop sehingga beberapa gambaran yang didapatkan tidak begitu jelas. Kedua, teknik perubahan pH yang digunakan tidak dapat sepenuhnya mengikuti panduan Penteado dkk., meskipun mendapatkan hasil yang sesuai, diharapkan kedepannya dapat menggunakan alat khusus untuk mensimulasi pH cycling. Ketiga, perlakuan penyikatan yang dilakukan dengan menggunakan sikat gigi elektrik sangat bergantung dengan baterai eksternal yang digunakan. Rata-rata sikat gigi elektrik dapat berjalan hingga 5 jam secara terus-menerus kemudian harus diganti dengan baterai yang baru. Kedepannya diharapkan dapat menggunakan alat simulasi penyikatan yang khusus sehingga tidak diperlukan pergantian baterai secara terus-menerus dan limitasi terakhir, teknik

perubahan suhu yang digunakan tidak dapat mengikuti formula yang ada yaitu $5^{\circ}\text{C}-55^{\circ}\text{C}/1$ menit hal ini dikarenakan keterbatasan alat penelitian. Diharapkan kedepannya dapat digunakan alat khusus yang dapat menjalankan thermal cycling.

BAB 6

PENUTUP

Dalam praktik kedokteran gigi modern, penggunaan bahan seperti resin akrilik dan resin komposit tidak dapat dilepaskan dari berbagai kondisi yang menyerupai lingkungan rongga mulut sehari-hari. Aktivitas rutin seperti penyikatan gigi, perubahan suhu akibat konsumsi makanan dan minuman, serta fluktuasi tingkat keasaman (pH) menjadi faktor yang secara perlahan memengaruhi stabilitas material tersebut. Dalam dinamika ini, kedua jenis resin diketahui dapat melepaskan partikel mikroplastik sebagai bagian dari proses degradasi yang tidak kasat mata, namun relevan untuk dipahami.

Menariknya, ketika kedua bahan tersebut berada dalam paparan kondisi yang serupa, tidak tampak adanya perbedaan yang mencolok dalam kecenderungan pelepasan mikroplastik. Hal ini menunjukkan bahwa baik resin akrilik maupun resin komposit memiliki respons yang relatif sebanding terhadap tekanan mekanis, termal, maupun kimiawi yang terjadi di lingkungan oral. Dengan kata lain, fenomena pelepasan mikroplastik bukanlah karakteristik eksklusif salah satu bahan, melainkan bagian dari interaksi umum antara material berbasis polimer dengan lingkungannya.

Jika ditinjau secara lebih rinci, variasi jumlah partikel yang terlepas memperlihatkan dinamika yang cukup menarik. Pada resin akrilik, pelepasan mikroplastik cenderung lebih tinggi dalam kondisi penyikatan, sementara pada resin komposit,

perubahan suhu justru memberikan kontribusi yang lebih besar. Adapun perubahan pH menunjukkan pengaruh yang relatif seimbang pada kedua jenis material. Gambaran ini memperlihatkan bahwa setiap faktor lingkungan memiliki peran tersendiri dalam memengaruhi karakteristik material, sekaligus mengingatkan pentingnya pemahaman yang lebih luas terhadap keberlanjutan penggunaan bahan dalam kedokteran gigi.

Melalui pemaparan ini, pembaca diajak untuk melihat bahwa di balik kenyamanan dan efektivitas bahan restoratif, terdapat proses-proses mikro yang patut diperhatikan, baik dari sisi kesehatan maupun lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

1. Frias JPGL, Nash R. Microplastics: Finding a consensus on the definition. *Mar Pollut Bull.* 2019; 138: 145-147.
2. Jaikumar G, Brun NR, Vijver MG, Bosker T. Reproductive toxicity of primary and secondary microplastics to three cladocerans during chronic exposure. *Environ Pollut.* 2019;249:638-646.
3. Yona D, Sari SHJ, Iranawati F, Bachri S, Ayuningtyas WC. Microplastics in the surface sediments from the eastern waters of Java Sea, Indonesia. *F1000Res.* 2019;8:98.
4. Koelmans AA, Mohamed Nor NH, Hermesen E, Kooi M, Mintenig SM, De France J. Microplastics in freshwaters and drinking water: Critical review and assessment of data quality. *Water Res.* 2019;155:410-422.
5. Mason SA, Welch VG, Joseph N. Synthetic Polymer Contamination in Bottled Water. *Front Cem.* 2018; 6: 407.
6. Cox KD, Covernton GA, Davies HL, Dower JF, Juanes F, Dudas SE. Human Consumption of Microplastics. *Environ Sci Technol.* 2019;53(12):7068-7074.
7. Scudo A, Liebmann B, Corden C, Tyrer D, Kreissig J, Warwick O. Intentionally added microplastic in products. *Amec Foster Wheeler.* 2017.
8. Van Landuyt KL, Yoshihara K, Geebelen B, Peumans M, Godderis L, Hoet P, Van Meerbeek B. Should we be concerned about composite (nano-)dust? *Dent Mater.* 2012;(11):1162-70.
9. Syakti AD, Nuning VH, Yales VJ. Simultaneous grading of microplastic size sampling in the Small Islands of Bintan water, Indonesia. *Elsevier.* 2018.

10. Khan FR, Syberg K, Shashoua Y, Bury NR. Influence of polyethylene microplastic beads on the uptake and localization of silver in zebrafish (*Danio rerio*). *Environ Pollut.* 2015;206:73-79.
11. Critchell K, Hoogenboom MO. Effects of microplastic exposure on the body condition and behavior of planktivorous reef fish (*Acanthochromis polyachanthus*). *PLoS ONE.* 2018. 13(3): e0193308.
12. Prata JC. Airbone microplastic: consequences to human health? *Environ Pollut.* 2018;234:115-126.
13. Mak CW, Ching-Fong Yeung K, Chan KM. Acute toxic effects of polyethylene microplastic on adult zebrafish. *Ecotoxicol Environ Saf.* 2019;182:109442. doi:10.1016/j.ecoenv.2019.109442
14. Kumarakulasingham M, Rooney PH, Dundas SR, et al. Cytochrome p450 profile of colorectal cancer: identification of markers of prognosis. *Clin Cancer Res.* 2005;11(10):3758-3765. doi:10.1158/1078-0432.CCR-04-1848
15. Tsujimoto A, Barkmeier WW, Fischer NG, Nojiri K, Nagura Y, Takamizawa T, Latta MA, Miazaki M. Wear of resin composites: Current insights into underlying mechanisms, evaluation methods and influential factors. *Jpn Dent Sci Rev.* 2018;54(2):76-87.
16. Szczesio-Wlodarczyk A, Sokolowski J, Kleczewska J, Bociong K. Ageing of Dental Composites Based on Methacrylate Resins-A Critical Review of the Causes and Method of Assessment. *Polymers (Basel).* 2020;12(4):882.
17. Opdam NJ, van de Sande FH, Bronkhorst E, Cenci MS, Bottenberg P, Pallesen U, Gaengler P, Lindberg A, Huysmans MC, van Dijken JW. Longevity of posterior composite restorations: a systematic review and meta-analysis. *J Dent Res.* 2014;93(10):943-9.

18. Montagner AF, Sande FHV, Müller C, Cenci MS, Susin AH. Survival, Reasons for Failure and Clinical Characteristics of Anterior/Posterior Composites: 8-Year Findings. *Braz Dent J.* 2018;29(6):547-554.
19. Rashid H, Sheikh Z, Vohra F. Allergic effects of the residual monomer used in denture base acrylic resins. *Eur J Dent.* 2015;9(4):614-619.
20. Neppelenbroek KH, Kuroishi E, Hotta J, Marques VR, Moffa EB, Soares S, Urban VM. Surface properties of multilayered, acrylic resin artificial teeth after immersion in staining beverages. *J Appl Oral Sci.* 2015;23(4):376-82.
21. Perdana W, Diansari V, Rahmayani L. Distribusi frekuensi pemakaian gigi tiruan lepasan resin akrilik dan nilon termoplastik di beberapa praktek dokter gigi di Banda Aceh. *Jour Cann Dents.* 2016; 1(4): 1-5.
22. Kemenkes RI. Riset kesehatan dasar. Balitbang Kemenkes RI. 2018.
23. Moreno A, Haddad MF, Goiato MC, Rocha EP, Assunção WG, Filho HG, Santos EG, Sonogo MV, Santos DM. Epidemiological Data and Survival Rate of Removable Partial Dentures. *J Clin Diagn Res.* 2016;10(5):ZC84-7.
24. Bukleta MS, Bukleta D, Selmani M, Kuhar M. Frequency of Complete and Removable Partial Denture Treatment in the Primary Health Centres in Three Different Regions of Kosovo from 2002 to 2013. *Zdr Varst.* 2019;58(3):104-111.
25. Pjetursson BE, Brägger U, Lang NP, Zwahlen M. Comparison of survival and complication rates of tooth-supported fixed dental prostheses (FDPs) and implant-supported FDPs and single crowns (SCs). *Clin Oral Implants Res.* 2007;18 Suppl 3:97-113.
26. Gosavi SS, Gosavi SY, Alla RK. Local and systemic effects of unpolymerized monomer. *Dent Res J.* 2010; 7(2): 82-87.

27. Prata JC. Airbone microplastic: consequences to human health? *Environ Pollut.* 2018;234:115-126.
28. Abiola O. Analysis of microplastics and their removal from water. *Helsinki Metropolia.* 2017.
29. Maes T, Jessop R, Wellner N, Haupt K, Mayes AG. A rapid-screening approach to detect and quantify microplastics based on fluorescent tagging with Nile Red. *Sci Rep.* 2017;7:44501.
30. Ziani K, Ioniță-Mîndrican CB, Mititelu M, Neacșu SM, Negrei C, Moroșan E, Drăgănescu D, Preda OT. Microplastics: A Real Global Threat for Environment and Food Safety: A State of the Art Review. *Nutrients.* 2023 Jan 25;15(3):617.
31. Jiang B, Kauffman AE, Li L, McFee W, Cai B, Weinstein J, Lead JR, Chatterjee S, Scott GI, Xiao S. Health impacts of environmental contamination of micro- and nanoplastics: a review. *Environ Health Prev Med.* 2020 Jul 14;25(1):29.
32. Mortensen NP, Fennell TR, Johnson LM. Unintended human ingestion of nanoplastics and small microplastics through drinking water, beverages, and food sources. *NanoImpact.* 2021 Jan;21:100302.
33. Roslan NS, Lee YY, Ibrahim YS, Tuan Anuar S, Yusof KMKK, Lai LA, Brentnall T. Detection of microplastics in human tissues and organs: A scoping review. *J Glob Health.* 2024 Aug 23;14:04179.
34. Lambert S, Sinclair C, Boxall A. Occurrence, degradation, and effect of polymer-based materials in the environment. *Rev Environ Contam Toxicol.* 2014;227:1-53.
35. Thompson RC, Olsen Y, Mitchell RP, Davis A, Rowland SJ, John AW, McGonigle D, Russell AE. Lost at sea: where is all the plastic? *Science.* 2004 May 7;304(5672):838.
36. Lambert S, Scherer C, Wagner M. Ecotoxicity testing of microplastics: Considering the heterogeneity of

- physicochemical properties. *Integr Environ Assess Manag*. 2017 May;13(3):470-475.
37. Arthur C, Baker J, Bamford H. Proceedings of the international research workshop on the occurrence, effects, and fate of microplastic marine debris. NOAA Technical Memorandum. 2009. Available: https://marinedebris.noaa.gov/sites/default/files/publications-files/TM_NOS-ORR_30.pdf.
 38. GESAMP. Sources, fate and effects of microplastic in the marine environment: a Global Assessment. GESSAMP. 2017. Available: https://ec.europa.eu/environment/marine/good-environmental-status/descriptor-10/pdf/GESAMP_microplastics%20full%20study.pdf.
 39. Priya A, Anusha G, Thanigaivel S, Karthick A, Mohanavel V, Velmurugan P, Balasubramanian B, Ravichandran M, Kamyab H, Kirpichnikova IM, Chelliapan S. Removing microplastics from wastewater using leading-edge treatment technologies: a solution to microplastic pollution-a review. *Bioprocess Biosyst Eng*. 2023 Mar;46(3):309-321.
 40. Umrai Shariff K, Le A, Goodwin-Loughton E, Chung M, Ali A, Farella M, Venugopal A. Microplastics and nanoplastics in clinical dentistry and orthodontics: leaching, health implications, and future directions: a narrative review. *Prog Orthod*. 2025 Nov 26;26(1):49. doi: 10.1186/s40510-025-00597-9. PMID: 41296116; PMCID: PMC12657672.
 41. Šimunović L, Bačić I, Meštrović S. Micro- and Nanoplastics in Dentistry: Challenges in Obtaining High-Quality Evidence. *Materials (Basel)*. 2025 Sep 12;18(18):4269.
 42. Chandran T., Unnikrishnan V., Warriar A.K. Microplastics in Dentistry—A Review. In: Muthu S.S., editor. *Microplastic Pollution*. Springer; Singapore: 2021. pp. 157–174.

43. Mulligan S., Ojeda J.J., Kakonyi G., Thornton S.F., Moharamzadeh K., Martin N. Characterisation of Microparticle Waste from Dental Resin-Based Composites. *Materials*. 2021;14:4440.
44. Frias JPGL, Nash R. Microplastic: Finding a Consensus on Definition. *Mar Pollut Bull*. 2019 Jan;138:145-147
45. Chen Y., Chen J., Guo J., Yao M., Liu Y., Qian J., Ma Q. Release of Microplastics during Dental Procedures and Denture Wear: Impact on Dental Personnel and Patients. *J. Hazard. Mater*. 2025;494:138463.
46. Alqutaibi A.Y., Hamadallah H.H., Aloufi A.M., Alharbi A.T., Alaydaa R.M., Alghauli M.A. Dental zirconia residuals recycling: Processes, applications, and future perspectives: A scoping review. *BMC Oral Health*. 2025;25:725.
47. Quinzi V., Orilisi G., Vitiello F., Notarstefano V., Marzo G., Orsini G. A Spectroscopic Study on Orthodontic Aligners: First Evidence of Secondary Microplastic Detachment after Seven Days of Artificial Saliva Exposure. *Sci. Total Environ*. 2023;866:161356.
48. Chojnacka K., Mikulewicz M. Cytotoxicity and Endocrine Disruption in Materials Used for Removable Orthodontic Retainers: A Comprehensive Review. *Dent. J*. 2025;13:269.
49. Lei K., Qiao F., Liu Q., Wei Z., Qi H., Cui S., Yue X., Deng Y., An L. Microplastics Releasing from Personal Care and Cosmetic Products in China. *Mar. Pollut. Bull*. 2017;123:122–126.
50. Tanna D.A., Bhandary S. The hidden hazards: The silent invasion of microplastics in dentistry (Review) *World Acad. Sci. J*. 2025;7:35.
51. World Health Organization (WHO) Rational Use of Personal Protective Equipment for Coronavirus Disease (COVID-19) and Considerations during Severe Shortages. WHO; Geneva, Switzerland: 2020.

52. Akhtar N., Tahir A., Qadir A., Masood R., Gulzar Z., Arshad M. Profusion of Microplastics in Dental Healthcare Units: Morphological, Polymer, and Seasonal Trends with Hazardous Consequences for Humans. *J. Hazard. Mater.* 2024;479:135563.
53. Akhtar N., Tahir A., Qadir A., Masood R., Gulzar Z., Arshad M. Profusion of Microplastics in Dental Healthcare Units: Morphological, Polymer, and Seasonal Trends with Hazardous Consequences for Humans. *J. Hazard. Mater.* 2024;479:135563.
54. Food and Agriculture Organization. Microplastics in food commodities. A food safety review on human exposure through dietary sources Available at: <https://www.fao.org/documents/card/en/c/cc2392en>.
55. Lee Y, Cho J, Sohn J, Kim C. Health Effects of Microplastic Exposures: Current Issues and Perspectives in South Korea. *Yonsei Med J.* 2023 May;64(5):301-308. doi: 10.3349/ymj.2023.0048. PMID: 37114632; PMCID: PMC10151227.
56. Kniggendorf A.-K., Wetzel C., Roth B. Microplastics Detection in Streaming Tap Water with Raman Spectroscopy. *Sensors.* 2019;19:1839. doi: 10.3390/s19081839.
57. Wang YL, Lee YH, Chiu IJ, Lin YF, Chiu HW. Potent Impact of Plastic Nanomaterials and Micromaterials on the Food Chain and Human Health. *Int J Mol Sci.* 2020;21(5):1727.
58. Nasser M. Evidence summary: can plastics used in dentistry act as an environmental pollutant? Can we avoid the use of plastics in dental practice? *British Dent Journal.* 2012.
59. Rokaya D, Srimaneepong V, Sapkota J, Qin J, Siraleartmukul K, Siriwongrungson V. Polymeric materials and films in dentistry: An overview. *J Adv Res.* 2018;14:25-34.

60. Mulligan S, Kankonyi G, Moharamzadeh K, Thornton SF, Martin N. The Enviromental Impact of Dental Amalgam and Resin-Base Composite Material. *British Journal Dental*. 2018;7:224.
61. Mousavinasab SM. Biocompatibility of composite resins. *Dent Res J (Isfahan)*. 2011;8(Suppl 1):S21-S29.
62. Ferracane JL. Is the wear of dental composites still a clinical concern? is there still a need for in vitro wear simulating devices? *Dent Mater*. 2006; 22: 689-692.
63. Gupta SK, Saxena P, Pant VA, Pant AB. Release and toxicity of dental resin composite. *Toxicol Int*. 2012;19(3):225-234.
64. Mara da Silva T, Barbosa Dantas DC, Franco TT, Franco LT, Rocha Lima Huhtala MF. Surface degradation of composite resins under staining and brushing challenges. *J Dent Sci*. 2019;14(1):87-92.
65. Krüger J, Maletz R, Ottl P, Warkentin M. In vitro aging behavior of dental composites considering the influence of filler content, storage media and incubation time. *PLoS One*. 2018;13(4):e0195160.
66. Leon BLT, Del BCAA, Rodrigues GRC. Loss of residual monomer from resilient lining materials processed by different methods. *Rev Odonto Cienc*. 2008;23:215-9.
67. Drummond JL. Degradation, fatigue and failure of resin dental composite materials. *J Dent Res*. 2008;87:710-9.
68. Dowarah K., Devipriya S.P. Microplastic Prevalence in the Beaches of Puducherry, India and Its Correlation with Fishing and Tourism/Recreational Activities. *Mar. Pollut. Bull*. 2019;148:123-133.
69. Vinay Kumar B.N., Löschel L.A., Imhof H.K., Löder M.G.J., Laforsch C. Analysis of microplastics of a broad size range in commercially important mussels by combining FTIR and Raman spectroscopy approaches. *Environ. Pollut*. 2021;269:116147.

70. Xu Y., Ou Q., Jiao M., Liu G., Van Der Hoek J.P. Identification and Quantification of Nanoplastics in Surface Water and Groundwater by Pyrolysis Gas Chromatography-Mass Spectrometry. *Environ. Sci. Technol.* 2022;56:4988–4997. doi: 10.1021/acs.est.1c07377.
71. Šimunović L., Pečanić P., Marić A.J., Haramina T., Rakić I.Š., Meštrović S. Impact of Various Cleaning Protocols on the Physical and Aesthetic Properties of 3D-Printed Orthodontic Aligners. *Sci. Rep.* 2025;15:19022.\
72. Quinzi V., Orilisi G., Vitiello F., Notarstefano V., Marzo G., Orsini G. A Spectroscopic Study on Orthodontic Aligners: First Evidence of Secondary Microplastic Detachment after Seven Days of Artificial Saliva Exposure. *Sci. Total Environ.* 2023;866:161356.
73. Xu Y., Ou Q., Jiao M., Liu G., Van Der Hoek J.P. Identification and Quantification of Nanoplastics in Surface Water and Groundwater by Pyrolysis Gas Chromatography-Mass Spectrometry. *Environ. Sci. Technol.* 2022;56:4988–4997.
74. Ceccarini A., Corti A., Erba F., Modugno F., La Nasa J., Bianchi S., Castelvetro V. *The Hidden Microplastics: New Insights and Figures from the Thorough Separation and Characterization of Microplastics and of Their Degradation Byproducts in Coastal Sediments.* *Environ. Sci. Technol.* 2018;52:5634–5643.
75. Bettencourt AF, Neves CB, de Almeida MS, Pinheiro LM, Oliveira SA, Lopes LP, Castro MF. Biodegradation of acrylic based resins: A review. *Dent Mater.* 2010;26(5):e171-80.
76. Tabatabaei MH, Arami S, Farahat F. Effect of mechanical loads and surface roughness on wear of silorane and methacrylate-based posterior composites. *J Dent (Tehran).* 2016 Nov; 13(6): 407-414.
77. Morresi AL, D'Amario M, Capogreco M, Gatto R, Marzo G, D'Arcangelo C, Monaco A. Thermal cycling for restorative

- materials: does a standardized protocol exist in laboratory testing? A literature review. *J Mech Behav Biomed Mater.* 2014;29:295-308.
78. Blumer L, Schmidli F, Weiger R, Fischer J. A systematic approach to standardize artificial aging of resin composite cements. *Dent Mater.* 2015;31(7):855-863.
 79. Pratap B, Gupta RK, Bhardwaj B, Nag M. Resin based restorative dental materials: characteristics and future perspectives. *Jpn Dent Sci Rev.* 2019;55(1):126-138.
 80. Featherstone JDB. Dental Caries: a dynamic disease process. *Aust Dent J.* 2008 Sep; 53(3): 286-91.
 81. Baliga S, Muglikar S, Kale R. Salivary pH: A diagnostic biomarker. *J Indian Soc Periodontol.* 2013;17:461-465.
 82. Penteado RA, Tonholo J, Júnior JG, Silva MF, Queiroz Cda S, Cavalli V, Rego MA, Liporoni PC. Evaluation of surface roughness of microhybrid and nanofilled composites after pH-cycling and simulated toothbrushing. *J Contemp Dent Pract.* 2010;11(6):E017-24.
 83. Hao Y, Huang X, Zhou X, Li M, Ren B, Peng X, Cheng L. Influence of Dental Prosthesis and Restorative Materials Interface on Oral Biofilms. *Int J Mol Sci.* 2018;19(10):3157.
 84. Paula AB, Toste D, Marinho A, Amaro I, Marto CM, Coelho A, Marques-Ferreira M, Carrilho E. Once Resin Composites and Dental Sealants Release Bisphenol-A, How Might This Affect Our Clinical Management? A Systematic Review. *Int J Environ Res Public Health.* 2019;16(9):1627.
 85. Liu K., Pang X., Chen H., Jiang L. Visual Detection of Microplastics Using Raman Spectroscopic Imaging. *Analyst.* 2023;149:161-168.
 86. Randhawa J.S. Advanced Analytical Techniques for Microplastics in the Environment: A Review. *Bull. Natl. Res. Cent.* 2023;47:174.

87. Moharamzadeh K, Brook IM, Noort RV. Biocompatibility of resin based dental materials. *Material (Basel)*. 2009; 2(2): 514-548.
88. Nayyer M, Zahid S, Hassan SH, Mian SA, Mehmood S, Khan HA, Kaleem M, Zafar MS, Khan AS. Comparative abrasive wear resistance and surface analysis of dental resin-based materials. *Eur J Dent*. 2018;12(1):57-66.
89. Bizhang M, Schmidt I, Chun YP, Arnold WH, Zimmer S. Toothbrush abrasivity in a long-term simulation on human dentin depends on brushing mode and bristle arrangement. *PLoS One*. 2017;12(2):e0172060.
90. Wiegand A, Burkhard JP, Eggmann F, Attin T. Brushing force of manual and sonic toothbrushes affects dental hard tissue abrasion. *Clin Oral Investig*. 2013;17(3):815-822.
91. Wang L, Garcia FC, Amarante de Araújo P, Franco EB, Mondelli RF. Wear resistance of packable resin composites after simulated toothbrushing test. *J Esthet Restor Dent*. 2004;16(5):303-315.
92. Campanale C, Massarelli C, Savino I, Locaputo V, Uricchio VF. A Detailed Review Study on Potential Effects of Microplastics and Additives of Concern on Human Health. *Int J Environ Res Public Health*. 2020;17(4):1212.
93. CONTAM. Presence of microplastics and nanoplastics in food, with particular focus on seafood. *EFSA Journal*. 2016; 14(6): 4501. Available: <https://efsa.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.2903/j.efsa.2016.4501>
94. Smith M, Love DC, Rochman CM, Neff RA. Microplastics in Seafood and the Implications for Human Health. *Curr Environ Health Rep*. 2018;5(3):375-386.
95. Wright SL, Frank K. Plastic and Human Health: a Micro Issue? *Environ Sci Technol*. 2017 Jun 20;51(12):6634-6647.

96. Lusher A, Hollman P, Mendoza HJ. Microplastic in fisheries and aquaculture: status of knowledge on their occurrence and implication for aquatic organisms and food safety. *FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper*. 2017.
97. Johnson NG, Burnett Louis E, Burnett KG. Properties of bacteria that trigger hemocytopenia in the atlantic blue crab, *Callinectes sapidus*. *Biol Bull*. 2011 Oct; 221(2): 164-175.
98. Rochman CM, Hoh E, Kurobe T, Teh SJ. Ingested plastic transfers hazardous chemicals to fish and induces hepatic stress. *Sci Rep*. 2013;3:3263.
99. Bergmann M, Gutlow L, Klages M. Marine anthropogenic litter. *Springer*. 2015.
100. ATSDR. Public health statement polychlorinated Biphenyls (PCBS). ATSDR. 2015. Available: <https://www.atsdr.cdc.gov/phs/phs.asp?id=139&tid=26>
101. Enyoh CE, Wirnkor VW, Ngozi. Uptake of microplastics by plant: a reason to worry or to be happy? *World Sci*. 2019; 131: 256-267.
102. Barboza LGA, Dick Vethaak A, Lavorante BRBO, Lundebye AK, Guilhermino L. Marine microplastic debris: An emerging issue for food security, food safety and human health. *Mar Pollut Bull*. 2018;133:336-348.
103. Akhtar N., Tahir A., Qadir A., Masood R., Gulzar Z., Arshad M. Profusion of Microplastics in Dental Healthcare Units: Morphological, Polymer, and Seasonal Trends with Hazardous Consequences for Humans. *J. Hazard. Mater*. 2024;479:135563. doi: 10.1016/j.jhazmat.2024.135563.
104. Schwabl P, Köppel S, Königshofer P, Bucsics T, Trauner M, Reiberger T, Liebmann B. Detection of Various Microplastics in Human Stool: A Prospective Case Series. *Ann Intern Med*. 2019;171(7):453-457.

105. Gasperi J, Wrigh SL, Dris R, Collard F, Mandin C, Guerrouache M, Langlois V, Kelly FJ, Tassin B. Microplastics in air; are we breathing it in? *Curr Opin Environ Sci Health*. 2018; 1: 1-5.
106. Lehner R, Weder C, Petri-Fink A, Rothen-Rutishauser B. Emergence of Nanoplastic in the Environment and Possible Impact on Human Health. *Environ Sci Technol*. 2019;53(4):1748-1765. doi:10.1021/acs.est.8b05512
107. Paget V, Dekali S, Kortulewski T, Grall R, Gamez C, Blazy K, Aguerre-Chariol O, Chevillard S, Braun A, Rat P, Lacroix G. Specific uptake and genotoxicity induced by polystyrene nanobeads with distinct surface chemistry on human lung epithelial cells and macrophages. *PLoS One*. 2015 Apr 15;10(4):e0123297.
108. Thompson RC, Moore CJ, vom Saal FS, Swan SH. Plastics, the environment and human health: current consensus and future trends. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*. 2009;364(1526):2153-2166.
109. Fenech M, Kirsch-Volders M, Natarajan AT, Surralles J, Crott JW, Parry J, Norppa H, Eastmond DA, Tucker JD, Thomas P. Molecular mechanisms of micronucleus, nucleoplasmic bridge and nuclear bud formation in mammalian and human cells. *Mutagenesis*. 2011 Jan;26(1):125-32.)
110. Horvatits T, Tamminga M, Liu B, Sebode M, Carambia A, Fischer L, Püschel K, Huber S, Fischer EK. Microplastics detected in cirrhotic liver tissue. *EBioMedicine*. 2022 Aug;82:104147.
111. Dąbrowska A, Komorowska W, Kriszt B, Szabó I. Feasibility of Raman and FTIR spectroscopy for direct microplastic search in the human milk samples: Comparative qualitative study. *Ecotoxicol Environ Saf*. 2025 May;296:118159.

112. Di Spirito F, Folliero V, Di Palo MP, De Benedetto G, Aulisio L, Martina S, Rinaldi L, Franci G. Micro- and Nanoplastics and the Oral Cavity: Implications for Oral and Systemic Health, Dental Practice, and the Environment-A Narrative Review. *J Funct Biomater*. 2025 Sep 6;16(9):332.
113. Shao K, Zou R, Zhang Z, Mandemaker LDB, Timbie S, Smith RD, Durkin AM, Dusza HM, Meirer F, Weckhuysen BM, Alderete TL, Vermeulen R, Walker DI. Advancements in Assays for Micro- and Nanoplastic Detection: Paving the Way for Biomonitoring and Exposomics Studies. *Annu Rev Pharmacol Toxicol*. 2025 Jan;65(1):567-585.
114. Umrai Shariff K, Le A, Goodwin-Loughton E, Chung M, Ali A, Farella M, Venugopal A. Microplastics and nanoplastics in clinical dentistry and orthodontics: leaching, health implications, and future directions: a narrative review. *Prog Orthod*. 2025 Nov 26;26(1):49.
115. Zarfl C. Promising techniques and open challenges for microplastic identification and quantification in environmental matrices. *Anal Bioanal Chem*. 2019 Jul; 411(17): 3743-3756.
116. Miller ME, Kroon FJ, Motti CA. Recovering microplastics from marine samples: a review of current practices. *Marin Pollut Bull*. 2017; 123: 6-18.
117. Nakajima R, Tsuchiya M, Lindsay DJ, Kitahashi T, Fujikura K, Fukushima T. A new small device made of glass for separating microplastics from marine and freshwater sediments. *PeerJ*. 2019;7:e7915.
118. Lusher AL, Welden NA, Sobral P, Cole M. Sampling, isolating and identifying microplastics ingested by fish and invertebrates. *Anal Methods*. 2017; 9: 1346-1360.
119. Schnitzler JG, Bernelot Moens SJ, Tiessens F, Bakker GJ, Dallinga-Thie GM, Groen AK, Nieuwdorp M, Stroes ESG, Kroon J. Nile Red Quantifier: a novel and quantitative tool

- to study lipid accumulation in patient-derived circulating monocytes using confocal microscopy. *J Lipid Res.* 2017;58(11):2210-2219.
120. Andrady AL. Microplastics in the marine environment. *Marine Pollu Bull.* 2011. 1596-1605.
 121. Hengstman E, Fischer EK. Nile red staining in microplastic analysis-proposal for a reliable and fast identification approach for large microplastics. *Environ Monit Assess.* 2019;191:612.
 122. Gagne F, Auclair j, Quinn B. Detection of polystyrene nanoplastics in biological samples based on the solvatochromic properties of nile red: application in hydra attenuate exposed to nanoplastics. *Environ Sci Pollut Res.* 2019; 26: 33524-33531.
 123. Tiwari M, Rathod TD, Ajmal PY, Bhangare RC, Sahu SK. Distribution and characterization of microplastics in beach sand from three different Indian coastal environments. *Mar Pollut Bull.* 2019;140:262-273.
 124. Kniggendorf AK, Wetzel C, Roth B. Microplastics detection in streaming tap water with Raman spectroscopy. *Sensors (Basel).* 2019 Apr; 19(8): 1839.
 125. Melanie B, Lars G, Klages M. Marine anthropogenic litter. *Springer.* 2015; 8: 201-227.
 126. Przygoda-Kuś P, Kosiorowska KE, Urbanek AK, Mironczuk AM. Current Approaches to Microplastics Detection and Plastic Biodegradation. *Molecules.* 2025 Jun 4;30(11):2462. doi: 10.3390/molecules30112462. PMID: 40509349; PMCID: PMC12156231.
 127. Sobhani Z, Zhang X, Gibson C., Naidu R., Megharaj M., Fang C. Identification and visualisation of microplastics/nanoplastics by Raman imaging (i): Down to 100 nm. *Water Res.* 2020;174:115658.

128. Sun W., Zhang Y., Zhang H., Wu H., Liu Q., Yang F., Hou M., Qi Y., Zhang W. Exploitation of *Enterobacter hormaechei* for biodegradation of multiple plastics. *Sci. Total Environ.* 2024;907:167708.
129. Pimpke S, Wirth M, Lorenz C, Gerdt G. Reference database design for the automated analysis of microplastic samples based on Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy. *Anal Bioanal Chem.* 2018;410(21):5131-5141.
130. Rad MA, Ahmad MR, Nakajima M, Kojima S, Homma M, Fukuda T. Application of Environmental Scanning Electron Microscope-Nanomanipulation System on Spheroplast Yeast Cells Surface Observation. *Scanning.* 2017;2017:8393578.
131. Wang ZM, Wagner J, Ghosal S, Bedi G, Wall S. SEM/EDS and optical microscopy analyses of microplastics in ocean trawl and fish guts. *Sci Total Environ.* 2017;603-604:616-626.
132. León BL, Del Bel Cury AA, Rodrigues Garcia RC. Loss of residual monomer from resilient lining materials processed by different methods. *Rev Odontol Ciêc.* 2008;23:215-9
133. Bayraktar G, Guvener B, Bural C, Uresin Y. Influence of polymerization method, curing process, and length of time of storage in water on the residual methyl methacrylate content in dental acrylic resins. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater.* 2006;76:340-5.
134. Urban VM, Machado AL, Vergani CE, Giampaolo ET, Pavarina AC, de Almeida FG, et al. Effect of water-bath post-polymerization on the mechanical properties, degree of conversion, and leaching of residual compounds of hard chairside reline resins. *Dent Mater.* 2009;25:662-71.

135. Tanoue N, Matsuda Y, Yanagida H, Matsumura H, Sawase T. Factors affecting the bond strength of denture base and reline acrylic resins to base metal materials. *J Appl Oral Sci.* 2013;21:320–6.
136. AlQahtani M, Haralur SB. Influence of Different Repair Acrylic Resin and Thermocycling on the Flexural Strength of Denture Base Resin. *Medicina (Kaunas).* 2020;56(2):50.
137. Bohra PK, Ganesh PR, Reddy MM, Ebeneazar AV, Sivakumar G. Colour stability of heat and cold cure acrylic resins. *J Clin Diagn Res.* 2015;9(1):ZC12-ZC15.
138. Kostic M, Pejicic A, Igic M, Gligorijevic N. Adverse reactions to denture resin materials. *Eur Rev Med Pharmacol Sci.* 2017;21(23):5298-5305.
139. Malik S., Waheed Y. Emerging applications of nanotechnology in dentistry. *Dent J.* 2023 Nov 15;11(11):266.
140. Pai E., Nayak A., Hallikerimath R.B., Ruttonji Z., Astagi P., Pokale S. Comparison of titanium dioxide nanoparticles and silver nanoparticles for flexural strength once incorporated in heat-cure acrylic denture base resin: an in vitro study. *J Indian Prosthodont Soc.* 2023 Apr-Jun;23(2):127–134.
141. Faot F., Panza L.H., Garcia R.C., Cury A.A. Impact and flexural strength, and fracture morphology of acrylic resins with impact modifiers. *Open Dent J.* 2009 Jun 29;3:137–143.
142. Leão R.S., de Moraes S.L.D., Gomes J.M.L., et al. Influence of addition of zirconia on PMMA: a systematic review. *Mater Sci Eng C.* 2020;106
143. Alzayyat S.T., Almutiri G.A., Aljandan J.K., et al. Effects of SiO₂ incorporation on the flexural properties of a denture base resin: an in vitro study. *Eur J Dermatol.* 2022 Feb;16(1):188–194.

144. Gligorijević N., Mihajlov-Krstev T., Kostić M., et al. Antimicrobial properties of silver-modified denture base resins. *Nanomaterials*. 2022 Jul 18;12(14):2453.
145. Thambirajoo M., Maarof M., Lokanathan Y., et al. Potential of nanoparticles integrated with antibacterial properties in preventing biofilm and antibiotic resistance. *Antibiotics (Basel)* 2021 Nov 2;10(11):1338.
146. Weisman D., Olmstead M., Kowalski J. In vitro evaluation of antibiotic elution from polymethylmethacrylate (PMMA) and mechanical assessment of antibiotic-PMMA composites. *Vet Surg*. 2000;29(3):245–251.
147. Moffa E.B., Malheiros S.S., Silva L.T.S. Antimicrobial activity of PMMA enriched with nano-clay loaded with metronidazole and chlorhexidine. *Braz Oral Res*. 2024;38
148. Cengiz S., Velioglu N., Cengiz M.İ., et al. Cytotoxicity of acrylic resins, particulate filler composite resin and thermoplastic material in artificial saliva with and without melatonin. *Materials*. 2022;15(4):1457. doi: 10.3390/ma15041457
149. Lassila L., Mangoush E., He J., Vallittu P.K., Garoushi S. Effect of post-printing conditions on the mechanical and optical properties of 3D-printed dental resin. *Polymers*. 2024;16(12):1713.
150. Goiato M.C., Santos D.M., Haddad M.F., Pesqueira A.A. Effect of accelerated aging on the microhardness and color stability of flexible resins for dentures. *Braz Oral Res*. 2010 Jan-Mar;24(1):114–119.
151. Papathanasiou I., Papavasiliou G., Kamposiora P., Zoidis P. Effect of staining solutions on color stability, gloss, and surface roughness of removable partial dental prosthetic polymers. *J Prosthodont*. 2021;31(1):e1–e10. doi: 10.1111/jopr.13360.

152. Gad M.M., Abualsaud R., Rahoma A., Al-Thobity A.M., Akhtar S., Fouad H. Effect of zirconia and titanium dioxide nanoparticles on the optical and surface properties of polymethyl methacrylate denture base material. *Int J Nanomed.* 2017;12:7473–7484
153. Sun J., Wang L., Wang J., et al. Characterization and evaluation of a novel silver nanoparticles-loaded polymethyl methacrylate denture base: in vitro and in vivo animal study. *Dent Mater J.* 2021 Sep 30;40(5):1100–1108.
154. Beyth N., Yudovin-Farber I., Perez-Davidi M., Domb A.J., Weiss E.I. Polyethyleneimine nanoparticles incorporated into resin composite cause cell death and trigger biofilm stress in vivo. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 2010 Dec 21;107(51):22038–22043.
155. Zakia M., Koo J.M., Kim D., et al. Development of silver nanoparticle-based hydrogel composites for antimicrobial activity. *Green Chem Lett Rev.* 2020;13(1):34–40.
156. Wang H., Gong X., Miao Y., et al. Preparation and characterization of multilayer films composed of chitosan, sodium alginate and carboxymethyl chitosan-ZnO nanoparticles. *Food Chem.* 2019 Jun 15;283:397–403.
157. Lourinho C., Salgado H., Correia A., Fonseca P. Mechanical properties of polymethyl methacrylate as denture base material: heat-polymerized vs. 3D-Printed—Systematic review and meta-analysis of in vitro studies. *Biomedicines.* 2022;10(10):2565.
158. Raszewski Z, Nowakowska-Toporowska A, Nowakowska D, Więckiewicz W. Update on Acrylic Resins Used in Dentistry. *Mini Rev Med Chem.* 2021;21:2130–2137.
159. Strang R, Whitters C, Brown D, Clarke RL, Curtis R, Hatton P, Ireland A, Lloyd C, McCabe J, Nicholson J, et al. Dental materials: 1996 literature review. Part 2. *J Dent.* 1998;26:273–291.

160. Gad MM, Fouda SM, Al-Harbi FA, Năpănkangas R, Raustia A. PMMA denture base material enhancement: A review of fiber, filler, and nanofiller addition. *Int J Nanomed*. 2017;12:3801–3812.
161. Zafar MS. Prosthodontic Applications of Polymethyl Methacrylate (PMMA): An Update. *Polymers*. 2020;12:2299.
162. Kostic M, Pejicic A, Igic M, Gligorijević N. Adverse reactions to denture resin materials. *Eur Rev Med Pharmacol Sci*. 2017;21:5298–5305.
163. Mousavi SM, Low FW, Hashemi SA, Lai CW, Ghasemi Y, Soroshnia S, Savardashtaki A, Babapoor A, Rumjit NP, Goh SM, et al. Development of graphene based nanocomposites towards medical and biological applications. *Artif Cells Nanomed Biotechnol*. 2020;48:1189–1205.
164. Fugolin APP, Pfeifer CS. New Resins for Dental Composites. *J Dent Res*. 2017;96(10):1085-1091.
165. Yap AU, Teoh SH, Chew CL. Effects of cyclic loading on occlusal contact area wear of composite restoratives. *Dent Mater*. 2002;18:149–158.
166. Demarco FF, Corrêa MB, Cenci MS, Moraes RR, Opdam NJ. Longevity of posterior composite restorations: not only a matter of materials. *Dent Mater*. 2012;28(1):87-101.
167. Demarco F.F., Cenci M.S., Montagner A.F., de Lima V.P., Correa M.B., Moraes R.R., Opdam N.J.M. Longevity of composite restorations is definitely not only about materials. *Dent Mater*. 2023;39:1–12.
168. Ferracane JL. A Historical Perspective on Dental Composite Restorative Materials. *J Funct Biomater*. 2024 Jun 25;15(7):173. doi: 10.3390/jfb15070173. PMID: 39057295; PMCID: PMC11277709.

169. Sancataldo G, Avellone G, Vetri V. Nile Red lifetime reveals microplastic identity. *Environ Sci Process Impacts*. 2020;22(11):2266-2275.
170. Somacal DC, Manfroí FB, Monteiro M, Oliveira SD, Bittencourt HR, Borges GA, Spohr AM. Effect of pH Cycling Followed by Simulated Toothbrushing on the Surface Roughness and Bacterial Adhesion of Bulk-fill Composite Resins. *Oper Dent*. 2020;45(2):209-218.
171. Ghavami-Lahiji M, Firouzmanesh M, Bagheri H, Jafarzadeh Kashi TS, Razazpour F, Behroozibakhsh M. The effect of thermocycling on the degree of conversion and mechanical properties of a microhybrid dental resin composite. *Restor Dent Endod*. 2018;43(2):e26.
172. Gonçalves L, Filho JD, Guimarães JG, Poskus LT, Silva EM. Solubility, salivary sorption and degree of conversion of dimethacrylate-based polymeric matrixes. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater*. 2008;85:320–325.
173. Bettencourt AF, Neves CB, de Almeida MS, Pinheiro LM, Oliveira SA, Lopes LP, Castro MF. Biodegradation of acrylic based resins: A review. *Dent Mater*. 2010;26(5):e171-80.
174. Shim WJ, Song YK, Hong SH, Jang M. Identification and quantification of microplastics using Nile Red staining. *Mar Pollut Bull*. 2016;113(1-2):469-476.
175. Lenz R, Enders K, Stedmon CA, Mackenzie DMA, Nielsen TG. A critical assessment of visual identification of marine microplastic using Raman spectroscopy for analysis improvement. *Mar Pollut Bull*. 2015;100(1):82-91.
176. Song YK, Hong SH, Jang M, et al. A comparison of microscopic and spectroscopic identification methods for analysis of microplastics in environmental samples. *Mar Pollut Bull*. 2015;93(1-2):202-209.
177. AlAli M, Silikas N, Satterthwaite J. The Effects of Toothbrush Wear on the Surface Roughness and Gloss of

- Resin Composites with Various Types of Matrices. *Dent J (Basel)*. 2021;9(1):8.
178. Constantinescu IR, Ursache M, Mardarez D. Effect of pH on the surface roughness of heat cured denture base acrylic resins. *Rev Med Chir Soc Med Nat Iasi*. 2007;111(2):477-481.
 179. Valinoti AC, Neves BG, da Silva EM, Maia LC. Surface degradation of composite resins by acidic medicines and pH-cycling. *J Appl Oral Sci*. 2008;16(4):257-265.
 180. Yong CQY, Valiyaveetill S, Tang BL. Toxicity of Microplastics and Nanoplastics in Mammalian Systems. *Int J Environ Res Public Health*. 2020;17(5):1509.
 181. Prietl B, Meindl C, Roblegg E, Pieber TR, Lanzer G, Fröhlich E. Nano-sized and micro-sized polystyrene particles affect phagocyte function. *Cell Biol Toxicol*. 2014;30(1):1-16.
 182. Dong CD, Chen CW, Chen YC, Chen HH, Lee JS, Lin CH. Polystyrene microplastic particles: In vitro pulmonary toxicity assessment. *J Hazard Mater*. 2020;385:121575.
 183. Poma A, Vecchiotti G, Colafarina S, et al. In Vitro Genotoxicity of Polystyrene Nanoparticles on the Human Fibroblast Hs27 Cell Line. *Nanomaterials (Basel)*. 2019;9(9):1299.

PROFIL PENULIS

drg. Jackson Dipankara, M.K.G



drg. Jackson Dipankara, M.K.G merupakan dosen dan akademisi di Fakultas Kedokteran Gigi Universitas Trisakti yang memiliki kompetensi dalam bidang kedokteran gigi. Penulis menyelesaikan pendidikan dokter gigi di Universitas Trisakti, kemudian melanjutkan studi magister di bidang Magister Ilmu

Kedokteran Gigi di Universitas Trisakti.

Sebagai akademisi, penulis aktif dalam melaksanakan tridharma perguruan tinggi yang meliputi pendidikan, penelitian, dan pengabdian kepada masyarakat. Penelitian penulis mengenai mikroplastik dalam kedokteran gigi, serta pengembangan pendekatan klinis berbasis bukti (evidence-based dentistry).

Penulis telah menghasilkan berbagai publikasi ilmiah pada jurnal nasional maupun internasional bereputasi, serta terlibat dalam kegiatan ilmiah seperti seminar, workshop, dan kolaborasi penelitian. Selain itu, penulis juga berperan dalam pengembangan bahan ajar dan inovasi pembelajaran di bidang kedokteran gigi.

Buku ini disusun sebagai bentuk kontribusi akademik dalam memperkaya khasanah keilmuan kedokteran gigi, khususnya dalam aspek mikroplastik dalam kedokteran gigi, serta diharapkan dapat menjadi referensi bagi mahasiswa, praktisi, dan akademisi di bidang terkait.

Prof. drg. Rahmi Amtha, MDS, PhD



Prof. drg. Rahmi Amtha, MDS, PhD adalah Guru Besar Ilmu Penyakit Mulut di Fakultas Kedokteran Gigi Universitas Trisakti. Pengalaman akademik selama lebih dari tiga puluh tahun berfokus pada pengembangan ilmu penyakit mulut, kanker mulut, lesi prakanker rongga mulut, faktor risiko kanker mulut, biomarker saliva. Pendidikan spesialis dan doktoralnya ditempuh di University of Malaya, Malaysia, dan adaptasi Spesialis Penyakit Mulut di Universitas Indonesia.

Di lingkungan Universitas Trisakti, beliau dipercaya sebagai Kepala Program Studi Doktor Fakultas Kedokteran Gigi, anggota Komisi Etik Penelitian, Dewan Riset Penelitian Fakultas serta anggota Komite Integritas Akademik Universitas. Selain aktif dalam pendidikan dan pelayanan klinis, juga banyak terlibat dalam berbagai kolaborasi penelitian nasional dan internasional yang berfokus pada deteksi dini kanker mulut, implementasi teknologi kesehatan digital, epidemiologi penyakit mulut, dan pengembangan biomarker saliva untuk mendukung diagnosis penyakit serta berperan aktif di Ikatan Ilmu Penyakit Mulut Indonesia.

Sebagai peneliti, Prof. Rahmi Amtha telah menghasilkan berbagai publikasi pada jurnal ilmiah bereputasi internasional serta berperan dalam sejumlah konsorsium penelitian regional di Asia Tenggara. Kontribusinya tidak hanya terbatas pada pengembangan ilmu pengetahuan, tetapi juga pada penyusunan kebijakan, pedoman klinis, dan penguatan kapasitas sumber daya manusia di bidang kesehatan gigi dan mulut.

Selain karya ilmiah dalam bentuk artikel jurnal, beliau juga aktif menulis dan menyunting buku ajar serta buku referensi yang digunakan dalam pendidikan kedokteran gigi dan kedokteran gigi spesialis. Beberapa karya tersebut berkontribusi dalam pengembangan standar pelayanan, kewenangan klinis, serta praktik kedokteran gigi berbasis bukti di Indonesia.

Melalui buku ini, penulis berbagi pengalaman akademik, klinis, dan penelitian yang telah dikembangkan selama bertahun-tahun dengan harapan dapat memperkaya wawasan pembaca serta mendukung kemajuan ilmu pengetahuan dan pelayanan kesehatan gigi dan mulut di Indonesia.

Dr. drg. Joko Kusnoto, MS, Sp.Ort



Dr. drg. Joko Kusnoto, MS, Sp.Ort merupakan dosen dan akademisi di Bagian Ortodonti Fakultas Kedokteran Gigi Universitas Trisakti yang telah mengabdikan diri dalam bidang pendidikan, penelitian, dan pelayanan kesehatan gigi dan mulut, khususnya Ortodonti. Penulis menyelesaikan pendidikan dokter gigi di Universitas Trisakti, kemudian melanjutkan studi Master of Science in Oral Sciences serta pendidikan spesialis Ortodonti di University of Illinois at Chicago, Amerika Serikat. Selanjutnya, penulis meraih gelar Doktor dan menyelesaikan program adaptasi spesialis Ortodonti di Universitas Indonesia.

Sebagai akademisi, penulis aktif melaksanakan tridharma perguruan tinggi melalui kegiatan pendidikan, penelitian, dan pengabdian kepada masyarakat. Bidang kajian dan penelitian yang ditekuni meliputi ortodonti klinis, estetika wajah, pertumbuhan dan perkembangan kraniofasial, maturasi skeletal, kesehatan rongga mulut pada pasien ortodonti, serta pemanfaatan teknologi dan inovasi dalam bidang ortodonti.

Penulis telah menghasilkan berbagai publikasi ilmiah pada jurnal nasional dan internasional bereputasi, menjadi editor dan kontributor beberapa buku ortodonti, serta aktif sebagai *reviewer* pada sejumlah jurnal ilmiah di bidang kedokteran gigi dan kesehatan. Selain itu, penulis juga aktif dalam organisasi profesi nasional maupun internasional, seperti Persatuan Dokter Gigi Indonesia, Ikatan

Ortodontis Indonesia, American Association of Orthodontists, dan World Federation of Orthodontists.

drg. Rosalina Tjandrawinata, MSi., PhD



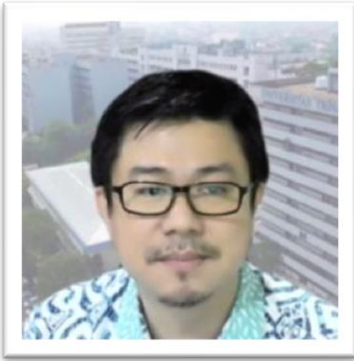
Buku ini disusun sebagai bentuk kontribusi akademik dalam memperkaya pemahaman mengenai mikroplastik dalam kedokteran gigi. Penulis berharap buku ini dapat menjadi referensi ilmiah yang bermanfaat bagi mahasiswa, praktisi, peneliti, dan akademisi dalam memahami tantangan serta perkembangan ilmu pengetahuan terkait mikroplastik di bidang kedokteran gigi. drg. Rosalina Tjandrawinata, MSi., PhD

merupakan dosen dan akademisi di Fakultas Kedokteran Gigi Universitas Trisakti yang memiliki kompetensi dalam bidang material kedokteran gigi. Penulis menyelesaikan pendidikan dokter gigi di Universitas Indonesia, kemudian melanjutkan studi magister di bidang Material Science, di Fakultas Pasca Sarjana Universitas Indonesia. Selanjutnya penulis memperoleh gelar PhD setelah mendapat kesempatan untuk melanjutkan pendidikan di Okayama University Graduate School of Medicine and Dentistry, Jepang dalam bidang Biomaterial Kedokteran Gigi.

Sebagai akademisi, penulis aktif melakukan penelitian bersama rekan peneliti lainnya dalam bidang material kedokteran gigi, dan melakukan publikasi di jurnal nasional maupun internasional; serta berperan serta dalam berbagai kegiatan ilmiah lainnya. Salah satu penelitian yang diangkat pada buku ini adalah mengenai mikroplastik, yang merupakan salah satu material yang perlu mendapat perhatian berbagai pihak saat ini. Dengan segala kelebihan dan kekurangannya, material plastik atau polimer merupakan material yang cukup banyak digunakan dalam bidang kedokteran gigi.

Diharapkan buku ini dapat memberikan pemahaman tambahan dalam bidang mikropplastik di bidang kedokteran gigi, serta menjadi referensi bagi mahasiswa, akademisi, praktisi, dan berbagai pihak yang bergerak di bidang terkait.

drg. Ferry Sandra, Ph.D., MIPM, PBO, FIMMA



drg. Ferry Sandra, Ph.D., MIPM, PBO, FIMMA meraih gelar dokter gigi dari Universitas Indonesia pada tahun 1996 dan gelar *Doctor of Philosophy* (Ph.D.) dari Kyushu University pada tahun 2001. Setelah itu, Ferry melanjutkan program *postdoctoral* di Harvard Medical School. Selain itu, Ferry juga memperoleh sertifikasi dalam bidang *Master of International Project Management* (MIPM), serta diangkat sebagai Pakar Biologi Oral (PBO) dan *Fellow of Indonesia Military Medicine Association* (FIMMA). Minat riset Ferry mencakup berbagai bidang, seperti Biokimia, Biologi Molekuler, Patologi, *Stem Cell* dan Biologi Kanker serta Pensinyalan Sel.

Saat ini, Ferry bertugas sebagai pengajar di Fakultas Kedokteran Gigi Universitas Trisakti. Selain itu, Ferry juga aktif sebagai Wakil Presiden *Asian Cellular Therapy Organization* (ACTO) dan Wakil Ketua *Indonesian Association for the Study of Medicinals* (IASMED).

Dalam rangka memajukan ilmu biomedis di Indonesia, Ferry telah mendirikan 9 pusat penelitian yang menjembatani lingkungan akademik dan industri. Ferry juga telah menjadi *keynote speaker* di lebih dari 300 seminar, mempublikasikan lebih dari 243 artikel ilmiah dan buku, serta membimbing 50 mahasiswa pascasarjana jenjang magister maupun doktoral. Publikasinya telah memperoleh lebih dari 3900 sitasi dengan H-indeks sebesar 30 pada berbagai jurnal internasional bereputasi dan terindeks *Web of Science/Scopus*.

MIKROPLASTIK DALAM KEDOKTERAN GIGI



MIKROPLASTIK DALAM KEDOKTERAN GIGI

Buku Mikroplastik dalam Kedokteran Gigi mengulas fenomena mikroplastik yang semakin menjadi perhatian global, khususnya dalam bidang kesehatan gigi dan mulut. Mikroplastik tidak hanya ditemukan di lingkungan, tetapi juga berpotensi berasal dari berbagai bahan kedokteran gigi seperti resin akrilik dan resin komposit. Melalui pembahasan yang sistematis, buku ini menjelaskan sumber, jenis, serta jalur paparan mikroplastik yang dapat masuk ke dalam tubuh manusia melalui aktivitas klinis maupun kehidupan sehari-hari.

Lebih lanjut, buku ini mengkaji proses degradasi material kedokteran gigi akibat faktor seperti penyikatan, perubahan suhu, dan pH yang dapat memicu pelepasan partikel mikroplastik. Disertai dengan metode identifikasi dan pengukuran mikroplastik, pembahasan dalam buku ini memberikan gambaran ilmiah mengenai potensi dampak mikroplastik terhadap kesehatan, baik secara lokal di jaringan oral maupun secara sistemik dalam tubuh manusia.

Sebagai penutup, buku ini tidak hanya menyoroti risiko, tetapi juga menawarkan perspektif solusi melalui pendekatan kedokteran gigi berkelanjutan. dokter gigi dan tekniker gigi diajak untuk memahami pentingnya penggunaan alat pelindung diri agar terhindar dari terpaparnya mikroplastik yang terlepas dari kegiatan pekerjaan serta pengelolaan limbah medis yang bertanggung jawab. Dengan demikian, buku ini menjadi referensi penting bagi akademisi, praktisi, dan masyarakat yang peduli terhadap kesehatan serta kelestarian lingkungan.



www.artamedia.co
artamediantara.co@gmail.com
@penerbitartamedia
@artamediantara



IKAPI
IKATAN PENERBIT INDONESIA
2017/2023



Harga P. Jawa Rp96.000