

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Pencemaran plastik telah menjadi salah satu isu lingkungan terbesar abad ke-21, dengan produksi plastik global yang mencapai lebih dari 400 juta ton per tahun dan diproyeksikan terus meningkat (Meshram & Mhatre, 2024). Sebagian besar limbah plastik berakhir di lingkungan perairan maupun daratan, mengalami fragmentasi menjadi partikel-partikel kecil yang dikenal sebagai mikroplastik. Mikroplastik didefinisikan sebagai partikel plastik berukuran kurang dari 5 mm yang bersifat persisten, sulit terurai secara alami, dan dapat terdistribusi luas melalui udara, tanah, serta sistem perairan. Karakteristik tersebut menjadikan mikroplastik sebagai salah satu bentuk pencemar lingkungan yang mendapat perhatian karena kemampuannya memengaruhi berbagai komponen ekosistem di bumi. Keberadaannya bahkan telah terdeteksi pada air minum kemasan, garam laut, dan udara sekitar yang dihirup manusia setiap hari (Zolotova *et al.*, 2022).

Indonesia termasuk salah satu negara dengan tingkat pencemaran mikroplastik tertinggi di dunia akibat pengelolaan limbah plastik yang belum optimal. Sebagian besar mikroplastik di perairan Indonesia berasal dari limbah plastik yang tidak terkelola dengan baik (*secondary microplastics*), meskipun keberadaan mikroplastik primer juga terdeteksi pada berbagai ekosistem perairan. Mikroplastik tersebar luas pada sungai, muara, pesisir, dan laut di berbagai wilayah Indonesia seperti Sungai Surabaya, Muara Kamal, Teluk Benoa, dan Selat Bali dengan konsentrasi yang bervariasi antara 0,049 sampai lebih dari 580 partikel per

liter. Bentuk mikroplastik yang dominan di perairan Indonesia meliputi fragmen, serat, dan filamen dengan jenis polimer utama seperti polietilena (PE) dan polipropilena (PP) yang umumnya berasal dari degradasi plastik sekali pakai dan limbah domestik (Warmansyah *et al.*, 2023).

Polyethylene terephthalate (PET) teridentifikasi sebagai polimer mikroplastik yang paling dominan di perairan Laut Flores, Indonesia, diikuti oleh mikroplastik jenis *polyethylene* (PE) (Herawati *et al.*, 2024). PET memiliki sifat fisikokimia yang stabil, seperti kepadatan tinggi dan ketahanan terhadap degradasi biologis, sehingga relatif tahan lama namun berpotensi tinggi untuk terfragmentasi menjadi mikroplastik di lingkungan. Mikroplastik PET telah terdeteksi dalam jumlah signifikan pada sampel air permukaan, sedimen laut, serta jaringan biota akuatik, yang menunjukkan kemampuannya untuk menyebar dan terakumulasi dalam rantai makanan. Karakteristik partikel PET, seperti kerapatan (densitas) dan kemampuannya berinteraksi dengan air (hidrofilisitas), menjadikan partikel PET mudah tersuspensi di perairan dan berpotensi masuk ke sistem biologis organisme. Peningkatan penggunaan PET dalam sektor industri dan rumah tangga menyebabkan akumulasi partikel ini semakin meluas, sehingga risiko paparan terhadap organisme hidup, termasuk manusia, tidak dapat dihindari. Paparan mikroplastik PET terhadap organisme menyebabkan berbagai respons biologis yang memengaruhi fungsi serta integritas jaringan tubuh (Li *et al.*, 2024).

Mikroplastik PET di lingkungan bertindak sebagai *carrier* (pembawa) bagi berbagai kontaminan berbahaya. Luas permukaan spesifik yang besar serta sifat hidrofobik pada mikroplastik mempermudah adsorpsi logam berat dan polutan

organik persisten (POPs) dari perairan (Pal *et al.*, 2025). Partikel yang telah teradsorpsi polutan ini kemudian mengalami transfer trofik melalui rantai makanan, sehingga meningkatkan derajat bioakumulasi pada organisme tingkat tinggi (Nair *et al.*, 2025). Interaksi gabungan antara partikel fisik mikroplastik dan zat kimia bawaannya dapat memicu toksisitas ganda yang mengganggu sistem endokrin serta sistem imun (Borriello *et al.*, 2023).

Karakteristik morfologi mikroplastik menentukan pola interaksi partikel dengan lingkungan maupun jaringan biologis. Mikroplastik di lingkungan terbagi ke dalam lima tipe utama, yaitu fragmen, serat (fiber), foam, film, dan pellet. Variasi bentuk ini muncul akibat perbedaan sumber dan mekanisme degradasi plastik. Fragmen dan film umumnya berasal dari pemecahan plastik sekali pakai seperti kemasan, foam terbentuk dari degradasi bahan berbusa seperti polistirena, serat dilepaskan dalam jumlah besar dari tekstil sintetis, sedangkan pellet merupakan bahan baku industri plastik yang dapat bocor ke lingkungan selama proses produksi dan distribusi. Fragmen merupakan bentuk yang paling dominan pada berbagai macam lingkungan, dan serat juga banyak ditemukan pada perairan serta sedimen (O'Connor *et al.*, 2025). Fragmen PET memiliki karakteristik morfologi yang khas berupa bentuk yang tidak beraturan (*irregular*), ukuran yang bervariasi dari mikro hingga submikro, serta permukaan yang bermuatan negatif. Morfologi iregular ini meningkatkan peluang kontak fisik partikel dengan sel dan dapat menimbulkan efek toksik, termasuk peningkatan produksi ROS dan penurunan viabilitas sel (Cui *et al.*, 2023).

Paparan mikroplastik terhadap organisme menyebabkan gangguan fisiologis

yang kompleks melalui berbagai mekanisme seluler dan biokimia. Mikroplastik mampu menembus sistem pertahanan biologis tubuh dan terdistribusi ke berbagai organ, termasuk hati; ginjal; paru-paru; dan otak, tempat partikel tersebut dapat memicu respons stres oksidatif dan inflamasi. Aktivasi jalur stres oksidatif meningkatkan produksi *Reactive Oxygen Species* (ROS) yang berperan dalam kerusakan membran sel, disfungsi mitokondria, dan induksi apoptosis. Kondisi inflamasi kronis yang dihasilkan dari paparan jangka panjang turut menyebabkan kerusakan DNA serta disfungsi sistemik pada organ vital. Efek tersebut menunjukkan mikroplastik bukan sekadar polutan fisik, melainkan agen toksik yang dapat mengganggu homeostasis organisme dan menurunkan fungsi sistem imun (Jeong *et al.*, 2024).

Dampak mikroplastik terhadap organisme hidup telah banyak diteliti pada berbagai spesies, baik akuatik maupun terestrial. Mikroplastik terdeteksi pada ikan, moluska, unggas, hewan ternak, hewan peliharaan, dan invertebrata tanah. Mikroplastik memasuki tubuh hewan melalui ingestasi pakan, air terkontaminasi, maupun respirasi, terakumulasi di organ vital seperti usus, hati, paru-paru, ginjal, darah, serta jaringan reproduksi. Akumulasi ini menimbulkan respons fisiologis khas pada setiap kelompok organisme. Ikan dan moluska mengalami penumpukan partikel di saluran pencernaan, hati, dan gonad yang disertai kerusakan jaringan serta penurunan fungsi reproduksi. Hewan ternak dan unggas terpapar melalui pakan yang terkontaminasi, yang terdeteksi pada pakan bebek serta feses babi dan unggas. Hewan peliharaan seperti anjing dan kucing juga memiliki partikel mikroplastik di ginjal, paru, hati, usus halus, dan darah. Keberadaan mikroplastik

pada tanah turut berdampak pada invertebrata tanah seperti cacing tanah, yang berpotensi mengganggu kesehatan tanah dan kesuburannya (Bhowmik *et al.*, 2024).

Efek biologis dan sistemik yang ditimbulkan mikroplastik pada berbagai organisme menunjukkan bahwa topik ini semakin banyak diteliti dalam dunia penelitian. Analisis bibliometrik dilakukan oleh Liu *et al.* (2023) menggunakan perangkat *VOSviewer* dan *CiteSpace* menunjukkan adanya peningkatan signifikan jumlah publikasi dalam beberapa tahun terakhir, yang menandakan perhatian dan kebutuhan riset yang semakin besar di bidang ini. Sebagian besar penelitian tersebut masih berfokus pada dampak mikroplastik terhadap biota laut dan lingkungan perairan, sementara riset pada hewan mamalia darat relatif terbatas. Kondisi tersebut menunjukkan perlunya penelitian lebih lanjut mengenai tingkat risiko dan mekanisme efek paparan mikroplastik terhadap kesehatan mamalia tingkat tinggi, termasuk manusia (Ding *et al.*, 2023).

Keterbatasan penelitian mengenai dampak mikroplastik pada mamalia darat menunjukkan perlunya penelitian yang lebih spesifik terhadap sistem tubuh yang berpotensi terpengaruh. Salah satu sistem tubuh yang rentan terhadap paparan mikroplastik adalah sistem imun. Sistem imun memiliki peran vital dalam mempertahankan tubuh dari patogen, toksin, maupun zat asing lainnya. Organ limfoid seperti limpa, timus, kelenjar limfa, dan sumsum tulang merupakan pusat aktivitas sel imun dan pembentukan respons kekebalan tubuh (Yang *et al.*, 2022). Paparan kronis dosis rendah mikroplastik berbahan *polyethylene terephthalate* (PET) memengaruhi sistem imun lokal dengan mengubah lingkungan mikro imun di usus. Analisis ekspresi gen menunjukkan adanya perubahan pada jalur imun dan

metabolisme, menandakan respons adaptif sel imun terhadap paparan mikroplastik. Pemeriksaan histologis tidak menemukan tanda peradangan yang jelas, namun analisis sinyal imun mengungkap perubahan interaksi sitokin yang menunjukkan gangguan homeostasis imun tanpa inflamasi akut (Harusato *et al.*, 2024).

Gangguan pada sistem imun akibat paparan mikroplastik juga dapat terjadi pada tingkat seluler. Paparan mikroplastik secara oral dengan dosis 1 mg selama 4 minggu pada mencit menyebabkan akumulasi partikel di berbagai organ disertai induksi apoptosis sel, inflamasi, dan disorganisasi struktur jaringan (Grote *et al.*, 2023). Paparan kronis mikroplastik juga dapat menyebabkan disregulasi sitokin yang berimplikasi pada gangguan keseimbangan imun (Sun & Wang, 2023). Sebagian besar penelitian *in vivo* menunjukkan adanya efek toksik mikroplastik pada organ seperti hati, ginjal, dan usus, sementara pemahaman mengenai dampaknya terhadap kesehatan manusia secara keseluruhan masih terbatas (Sharma & Kaushik, 2021). Fokus penelitian mengenai dampak mikroplastik pada organ limfoid seperti limpa masih relatif rendah dibandingkan dengan organ metabolik lain.

Keterbatasan informasi mengenai dampak mikroplastik pada organ limpa dibuktikan dengan beberapa laporan penelitian pada model organisme yang berbeda. Paparan kronis mikroplastik jenis PVC pada ikan *Cyprinus carpio* diketahui memicu infiltrasi sel inflamasi, hemosiderosis, serta degenerasi vakuolar pada jaringan limpa (Liu *et al.*, 2023). Kerusakan juga teramati pada *Coturnix japonica* yang mengalami inflamasi jaringan limpa dimediasi oleh jalur sinyal ROS-p38 MAPK dan TNF (Zhang *et al.*, 2024). Mencit C57BL/6J melalui paparan

oral polistirena terbukti menyebabkan peradangan sistemik dan disorganisasi struktur jaringan limpa yang signifikan (Zhang *et al.*, 2023). Keseragaman temuan patologis tersebut mengindikasikan bahwa jaringan limpa memiliki kerentanan terhadap akumulasi partikel plastik.

Penelitian dampak mikroplastik pada organ limpa dapat dilakukan dengan melihat ketidakteraturan struktur bagian-bagiannya di bawah mikroskop melalui metode histopatologi. Histologi merupakan ilmu yang mempelajari struktur jaringan normal, sedangkan histopatologi merupakan ilmu yang mempelajari patologi penyakit melalui perubahan morfologis yang dapat diamati secara mikroskopis. Histopatologi mencakup serangkaian prosedur preparasi preparat histologis dari jaringan yang mengalami kelainan untuk diamati di bawah mikroskop, termasuk fiksasi, pemrosesan, pemotongan, dan pewarnaan jaringan (Dewi *et al.*, 2023). Histopatologi organ limfoid berperan penting sebagai alat deteksi dini dalam mendeteksi lesi akibat paparan senyawa imunomodulator melalui evaluasi setiap bagian organ limfoid, yang memungkinkan identifikasi jenis sel target yang terdampak, perubahan produksi dan kematian sel, serta perubahan struktur jaringan (Elmore, 2012).

Histopatologi limpa digunakan untuk menilai dampak berbagai toksikan terhadap struktur jaringan organ imun. Gluhcheva *et al.* (2012) menunjukkan bahwa limpa yang mengalami stres oksidatif mengalami penurunan jumlah megakariosit, serta perubahan pada pulpa merah dan putih limpa akibat gangguan hematopoiesis dan aktivasi makrofag. Temuan ini sejalan dengan laporan El-Waseef (2020) yang mengidentifikasi penebalan kapsula, kongesti sinus darah,

serta penurunan kepadatan limfosit pada pulpa putih limpa sebagai indikator gangguan homeostasis imun akibat stres oksidatif dan inflamasi berkepanjangan.

Struktur limpa tikus Sprague Dawley memiliki kesamaan fungsional dengan limpa manusia dalam hal penyaringan darah dan pembentukan respons imun adaptif, sehingga sering dijadikan model dalam riset imunotoksikologi. Limpa tersusun atas dua struktur utama, yaitu pulpa putih dan pulpa merah, yang dipisahkan oleh zona marginal sebagai area interaksi antara antigen dan sel imun. Pulpa putih didominasi oleh limfosit, terutama sel B pada folikel limfoid dan sel T pada daerah *Periarteriolar Lymphoid Sheath* (PALS), yang berperan dalam aktivasi respons imun humoral dan seluler. Pulpa merah berfungsi menyaring eritrosit dan melakukan fagositosis terhadap sel darah tua melalui aktivitas makrofag. Keteraturan struktur ini menjadikan limpa tikus relevan sebagai model eksperimental untuk mengevaluasi efek imunotoksik dari paparan mikroplastik, khususnya dalam mengamati perubahan histologis yang dapat mencerminkan gangguan sistem imun mamalia tingkat tinggi (Steiniger, 2015).

Limpa merupakan organ limfoid sekunder yang berperan dalam pertahanan imun dengan mengaktifkan limfosit pada pulpa putih yang mengandung pusat germinal dan *periarteriolar lymphoid sheath* (Ikpegbu *et al.*, 2019). Perubahan struktur histologis limpa berupa hilangnya batas antara pulpa putih dan pulpa merah, penurunan kepadatan limfosit, serta kongesti sinusoid pada pulpa merah, mencerminkan penurunan aktivitas imun limpa (Zhao *et al.*, 2024). Paparan toksikan juga dapat mengubah morfologi dan fungsi limpa yang ditandai dengan penurunan indeks limpa atau rasio berat limpa terhadap berat tubuh (Gluhcheva *et*

al., 2012). Paparan mikroplastik dapat menyebabkan stres oksidatif, respons inflamasi, dan gangguan fisiologis yang menunjukkan potensi toksik terhadap fungsi biologis organ (Jeong *et al.*, 2024). Dampak paparan mikroplastik PET terhadap gambaran histopatologis limpa tikus Sprague Dawley, khususnya pada aspek morfometri pulpa putih dan pusat germinal sebagai indikator respons imun, belum diteliti sehingga diperlukan data dasar mengenai perubahan histopatologis limpa pada paparan dosis rendah sebagai acuan bagi penelitian selanjutnya.

Berdasarkan uraian di atas, penelitian terhadap perubahan histologi limpa tikus Sprague Dawley akibat paparan mikroplastik *polyethylene terephthalate* (PET) difokuskan pada pengukuran bobot limpa, diameter dan luas pulpa putih, serta pusat germinal sebagai variabel utama. Fokus penelitian pada organ limpa menjadi penting karena sebagian besar penelitian sebelumnya lebih menitikberatkan pada organ metabolik seperti hati dan ginjal. Pendekatan ini memperluas pemahaman mengenai efek imunotoksik mikroplastik serta memperkuat landasan bagi pengembangan riset toksikologi lingkungan yang berorientasi pada sistem imun.

1.2. Rumusan Masalah

Bagaimana dampak paparan mikroplastik jenis *polyethylene terephthalate* (PET) terhadap struktur histopatologis limpa tikus Sprague Dawley jantan, ditunjukkan dengan perubahan bobot limpa, diameter dan luas pulpa putih, diameter dan luas pusat germinal, serta indeks limpa?

1.3. Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dampak paparan mikroplastik jenis *polyethylene terephthalate* (PET) terhadap struktur histopatologis limpa tikus Sprague Dawley jantan, ditunjukkan dengan perubahan bobot limpa, diameter dan luas pulpa putih, diameter dan luas pusat germinal, serta indeks limpa.

1.4. Manfaat Penelitian

Penelitian ini memiliki sejumlah manfaat yang diharapkan dapat dirasakan oleh berbagai pihak, antara lain sebagai berikut.

1.4.1. Bagi Masyarakat

Penelitian ini memberikan gambaran risiko paparan mikroplastik PET terhadap limpa sebagai organ imun, sekaligus meningkatkan kesadaran masyarakat tentang bahaya plastik serta mendorong masyarakat untuk lebih bijak dalam penggunaan plastik sehari-hari.

1.4.2. Bagi Ilmu Pengetahuan

Penelitian ini menjadi acuan dalam riset toksikologi lingkungan dan histologi, khususnya terkait perubahan morfometrik limpa akibat paparan mikroplastik, serta dapat digunakan sebagai dasar bagi penelitian lanjutan mengenai mekanisme imunologis maupun evaluasi risiko biologis dari paparan mikroplastik.