

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kelimpahan, Sumber dan Distribusi Mikroplastik di TPA

Pencemaran mikroplastik di sistem tanah merupakan proses masuknya mikroplastik sebagai bahan pencemar ke dalam sistem tanah, baik di permukaan tanah (*top soil*), lapisan bawah tanah (*sub soil*) hingga dasar tanah yang berbatasan dengan sumber air tanah (Khoironi *et al.*, 2021). Sampah plastik yang berbentuk makroplastik akan menjadi mikroplastik akibat berbagai proses di dalam tanah saat berinteraksi dengan bahan organik dan anorganik, degradasi radiasi sinar ultraviolet (UV) dan proses abrasi fisika.

Pada umumnya, mikroplastik diklasifikasikan menjadi dua, yaitu primer dan sekunder. Partikel mikroplastik primer adalah partikel atau pelet berukuran mikro yang digunakan sebagai bahan baku di industri dan mikroplastik sekunder adalah partikel berukuran mikro yang dihasilkan dari degradasi plastik dan potongan plastik berukuran besar (Faure *et al.*, 2012).

Mikroplastik tersebar luas di lingkungan, antara lain keberadaannya telah dilaporkan di laut (Stark, 2019), air tawar, air tanah (Samandra *et al.*, 2022), air limbah (Kalka, 2012) dan air minum (Mintenig *et al.*, 2019). Mikroplastik masuk ke dalam tanah melalui berbagai sumber seperti pembuangan dari instalasi pengolahan air limbah, *septic tank*, lindi dari Tempat Pembuangan Akhir (TPA) sampah, dan penggunaan mulsa plastik dalam pertanian (Singh & Bhagwat, 2022). TPA yang digunakan untuk pembuangan sampah, dapat menyimpan 21–42% dari produksi sampah plastik secara global (Nizzetto *et*

al., 2016).

TPA diduga melepaskan mikroplastik ke lingkungan dan untuk memperjelas kecurigaan bahwa TPA sebagai sumber potensial mikroplastik, dua belas sampel lindi dari empat tempat pembuangan sampah padat kota yang aktif dan dua tertutup diselidiki. Mikroplastik ditemukan di semua sampel lindi TPA tersebut. Secara total, tujuh belas jenis plastik berbeda diidentifikasi dalam sampel lindi dengan konsentrasi terhitung mulai dari 0,42 hingga 24,58 partikel/L. *Polyethylene* dan *polypropylene* adalah jenis polimer yang dominan (He *et al.*, 2019). Mikroplastik sebesar 99,36% berasal dari fragmentasi sampah plastik yang tertimbun di tempat pembuangan akhir. Ukuran mikroplastik 77,48% berkisar antara 100 dan 1000 μm . Pembentukan, akumulasi dan pelepasan mikroplastik di TPA adalah proses jangka panjang. Hasil penelitian He *et al.* (2019) memberikan bukti awal dan memvalidasi bahwa TPA bukanlah tempat pembuangan akhir plastik, tetapi sumber potensial mikroplastik.

Studi oleh Sun *et al.* (2021) tentang mikroplastik dalam sistem lindi TPA (jalur utama mikroplastik ke lingkungan) untuk partikel kecil $<50 \mu\text{m}$ dengan batas deteksi ukuran hingga 10 μm memiliki risiko lebih tinggi terhadap lingkungan. Partikel mikroplastik dan konsentrasi massa dalam lindi yang tidak diolah masing-masing adalah $235.4 \pm 17,1 \text{ item/L}$ dan $11,4 \pm 0,8 \text{ g/L}$, dengan partikel kecil ($<50 \mu\text{m}$) terhitung lebih dari 50%. Secara keseluruhan, 27 bahan polimer terdeteksi dalam sampel lindi, dengan polietilen dan polipropilen yang paling melimpah di lindi yang tidak diolah.

Mikroplastik dengan kepadatan rata-rata $0,94 \text{ g/cm}^3$ dan bentuk tidak beraturan sulit dihilangkan dengan sedimentasi. Eksplorasi lebih lanjut nasib mikroplastik di lindi yang diolah menunjukkan bahwa perawatan membran efektif mengurangi pemuatan mikroplastik hingga 0,14% untuk partikel dan 0,01% untuk massa, tetapi kerapatan partikel rata-rata meningkat. Mikroplastik kecil dapat dihasilkan dan dilepaskan dari sistem pengolahan limbah dengan sistem membran. Penelitian ini juga menemukan bahwa lumpur mengandung mikroplastik dengan jumlah yang tinggi dan diperkirakan mengandung partikel sekitar 3,6 kali lebih tinggi daripada pada lumpur yang diolah. Hal ini merupakan pendekatan baru untuk mitigasi mikroplastik melalui pemisahan mikroplastik dari cairan dewatering lumpur sebelum resirkulasi (Sun *et al.*, 2021).

Pada daerah perkotaan, tanah merupakan reservoir lingkungan utama untuk mikroplastik. Sepuluh sampel tanah tidak tercampur dikumpulkan dari lokasi TPA Sanitary Aminbazar, di antara sepuluh sampel, 3 sampel diidentifikasi memiliki mikroplastik masing-masing berupa *Low density polyethylene* (LDPE), *High density polyethylene* (HDPE), dan *Cellulose acetate* (CA). Batas deteksi berkisar 1-2000 μm . Studi ini menunjukkan bahwa mikroplastik adalah hasil yang didapatkan relatif lama dari aktivitas manusia dan secara signifikan dapat menyebabkan perubahan pada ekosistem terrestrial (Afrin *et al.*, 2020). Pada studi lainnya, jenis polimer mikroplastik yang banyak ditemukan di lingkungan antara lain *polyethylene* (PE) yang bersumber dari produk tas plastik; *polypropylene* (PP) bersumber dari produk botol plastik;

polystyrene (PS) berasal dari produk plastik peralatan makan atau *styrofoam*; *polyene terephthalete (PET)* berasal dari botol plastik kemasan; dan *polyvinyl chloride (PVC)* berasal dari pipa dan terpal.

Masing-masing jenis polimer mikroplastik ini memiliki karakteristik yang berbeda-beda sehingga pengaruhnya terhadap lingkungan juga berbeda. Karakteristik pertama adalah *specific gravity* atau rasio perbandingan antara densitas (massa dibagi volume) suatu zat dengan densitas standarnya (Yesiller et al., 2014). *Specific gravity* dari mikroplastik secara berturut-turut dari nilai paling besar adalah *polyvinyl chloride (PVC)* yaitu 1.38; lalu *polyene terephthalete (PET)* 1.37; *polystyrene (PS)* 1.05; HDPE 0.94; LDPE 0.91; PP 0.85. Besaran nilai *specific gravity* lebih dari 1 atau lebih besar dari *specific gravity* air, maka zat mudah mengendap dan demikian pula sebaliknya (Andrady, 2011). Dengan begitu, polimer *polypropylene (PP)* lebih mudah mengapung dan terbawa aliran air.

2.2 Kontaminasi Mikroplastik dalam Tanah TPA

Tanah tidak hanya merupakan wadah mikroplastik, tetapi juga dapat mewakili sumber potensial mikroplastik dari lingkungan tanah ke air tanah melalui berbagai cara, seperti kegiatan pertanian, limpasan air permukaan, dan banjir sehingga mengganggu air tanah dan ekosistem perairan (Bläsing & Amelung, 2018). Deteksi mikroplastik pada sampel tanah diketahui bentuk mikroplastik adalah partikel (92,9%), serat (6,1%) dan film (1%). Di tanah pertanian, morfologi mikroplastik sebagian besar berupa partikel dan beberapa

serat dan film. Bentuk partikel serat kemungkinan berasal dari irigasi atau deposisi serat di atmosfer, sedangkan partikel film berasal dari film mulsa (Su et al., 2021). Oleh karena itu, identifikasi karakteristik tanah dan kondisi hidrologi tanah sebagai media transport mikroplastik menjadi penting. Tanah di TPA Jatibarang yang dijadikan lokasi penelitian terdiri dari struktur tanah berupa lanau, pasir halus, pasir kasar, serta kerikil. Karakteristik kimia tanah seperti pH dengan rata-rata 6,9; kadar air tanah rata-rata 33%; dan porositas sebesar 53% (Amelinda et al., 2017). Semakin besar nilai porositas tanah maka semakin besar ruang atau pori-pori tanah yang dapat menjadi jalan transport aliran air atau penyimpanan air. Kondisi hidrolik tanah pada TPA Jatibarang berupa pola dan arah aliran air yang mana berasal dari bagian tenggara menuju selatan dari TPA.

Studi sebelumnya telah mengungkapkan bahwa gerakan ke bawah partikel mikro dapat terjadi melalui pori-pori tanah dan retakan ketika ukuran mikroplastik lebih kecil ukuran pori dari tanah (Bläsing & Amelung, 2018). Hasil studi lapangan di 29 lokasi di tanah riparian di sepanjang Sungai Yangtze menunjukkan bahwa tanah lapisan bawah (10–15 cm) mengandung mikroplastik yang lebih tinggi daripada tanah lapisan atas (0–5 cm), dan mikroplastik berukuran kecil (<200 μ m) menyumbang sekitar 70%. Kontaminasi ini dipengaruhi oleh curah hujan dan menunjukkan bahwa mikroplastik diangkut ke bawah melalui pori-pori tanah melalui pencucian (*leaching*) (Yanfei Zhou et al., 2021).

Dengan memanfaatkan model INCA-Contaminants, diperkirakan bahwa mikroplastik yang lebih kecil ($< 0,2$ mm) di dalam tanah pada akhirnya akan disalurkan ke air tanah dangkal (Nizzetto *et al.*, 2016). INCA-Contaminants adalah model fate kontaminan hidrobiogeokimia-sedimen terintegrasi semi-terdistribusi. Model ini dapat digunakan untuk mensimulasikan perpindahan partikel alami (partikel tanah dan sedimen tersuspensi) serta perpindahan partikel buatan (seperti MP). Dalam INCA-Contaminants, dua sifat fisik yang digunakan untuk mendefinisikan MP: dimensi (bentuk) dan densitas (ρ_{MP} , kg.m^{-3}). Beban lingkungan mikroplastik dapat mencakup bahan yang terbuat dari hampir semua jenis polimer yang digunakan. Meskipun kepadatan MP dapat dipengaruhi misalnya oleh pertumbuhan biofilm atau inklusi logam dalam polimer, dalam penelitian ini ρ_{MP} diasumsikan sebagai polimer murni.

Kepadatan mikroplastik (ρ_{MP}) dapat berkisar antara 160-2200 kg.m^{-3} . Partikel yang lebih ringan dari air diperkirakan akan mengapung dan tidak ditahan oleh sedimen dasar atau tanah. Sejumlah MP primer dan sekunder dipancarkan di darat memiliki nilai densitas mirip atau lebih tinggi dari air. Tidak ada hubungan yang jelas antara jenis polimer dan ukuran khas MP yang dilepaskan. Dimensi tergantung pada proses pembentukan dan jalur emisi. Mikroplastik primer digunakan dalam produk perawatan pribadi dan dilepaskan langsung dengan air limbah biasanya mempunyai dimensi 0,005-0,8 mm. Bahan yang dilepaskan dari cucian dan debu rumah tangga berada dalam kisaran 0,01-0,1 mm. Pelet plastik yang digunakan sebagai bahan baku cetakan plastik biasanya berukuran antara 1-5 mm. Pengelupasan cat berbasis

polimer di lingkungan perkotaan atau industri menghasilkan MP dikisaran khas 0,05-1 mm. Degradasi, pelapukan, penguraian sampah plastik di tempat pembuangan sampah dan tempat daur ulang yang buruk dapat menghasilkan MP di hampir semua rentang ukuran (misalnya 0,005-5 mm).

Goeppert dan Goldscheider (2021) menemukan bahwa partikel mikroplastik dari 1-5 μm dapat diangkut dalam jumlah yang signifikan dalam akuifer aluvial menempuh jarak dari 3,1 hingga 200 m di Lembah Rhine Atas di Jerman. Bukti pertama di lapangan dilakukan secara eksperimental untuk mengetahui transportasi mikroplastik jarak jauh di akuifer aluvial. Perpindahan partikel pelacak mikroplastik dibandingkan dengan uranin pelacak konservatif terlarut. Hasil dengan jelas menunjukkan bahwa (i) mikroplastik 1-5 μm dapat dipindahkan dalam jumlah yang signifikan di akuifer pasir dan kerikil; (ii) konsentrasi puncak mikroplastik dapat melebihi zat terlarut konservatif, khususnya untuk jarak aliran yang lebih jauh; (iii) kecepatan puncak mikroplastik dalam kisaran yang sama atau melebihi zat terlarut konservatif; (iv) proses retardasi dan filtrasi tidak secara efisien melemahkan mikroplastik dalam air tanah di lokasi penelitian (Goeppert & Goldscheider, 2021).

2.3 Potensi Risiko Mikroplastik terhadap Air Tanah di Sekitar TPA

Transportasi mikroplastik di dalam sistem tanah terjadi secara vertikal dan horizontal dengan keterlibatan faktor biotik dan abiotik. Proses transport

ini memberikan dampak negatif pada sistem tanah dan sistem perairan yang terhubung olehnya. Salah satu sistem yang berpotensi mendapatkan dampak pencemaran adalah sistem air tanah (Khoironi *et al.*, 2021). Ketika infiltrasi air meresap melalui retakan dan rongga tanah yang terkontaminasi tersebut, sehingga menyebabkan mikroplastik terdorong jauh lebih dalam ke lapisan tanah yang akhirnya tercampur dengan air tanah.

TPA merupakan salah satu sumber penting cemaran mikroplastik karena TPA telah mengumpulkan sekitar 79% dari total plastik murni yang diproduksi. Berdasarkan umur TPA, ketika lindi yang bersifat asam atau basa bersentuhan dengan sampah plastik yang dibuang dalam waktu yang lama, maka plastik terdegrasi bersamaan dengan terlepasnya plastik dan aditif yang terdapat pada permukaannya. Ketika lindi sarat mikroplastik bergerak melalui tanah di bawahnya dan mencapai sistem air tanah, itu menjadi sumber titik polusi mikroplastik (Singh & Bhagwat, 2022).

Hasil penelitian pada sampel air tanah di sekitar TPA Perungudi dan Kodungaiyur di India Selatan sebanyak 20 sampel ditemukan terkontaminasi partikel mikroplastik dalam kisaran 2-80 item/L dengan partikel berwarna putih (38%), hitam (27%), hijau (8%), merah (18%), biru (6%), dan kuning (2%). Jenis dan bentuk polimer ditemukan dalam urutan sebagai berikut: nilon (70%), pelet (18%), busa (6%), fragmen (3%), serat/PVC (2%), dan plastik (1%). Di kedua lokasi pengambilan sampel, 90% mikroplastik berasal dari plastik yang terkubur dan fragmentasi sampah yang didominasi oleh *polypropylene* (PP), *polystyrene* (PS). Mikro dan nano kelimpahan plastik di

air tanah sangat penting karena memiliki dampak besar pada kesehatan manusia (Bharath et al., 2021).

Sampai saat ini, kontaminasi mikroplastik dalam air tanah tidak dianggap tetapi telah terdeteksi sebanyak 12 partikel/L sehingga dapat disimpulkan bahwa perpindahan mikroplastik dari tanah ke air tanah memang terjadi. Enam belas dari 17 sampel air tanah yang dikumpulkan selama penelitian mengandung mikroplastik dengan konsentrasi rata-rata 6,4 partikel/L dan maksimum 15,2 partikel/L. Mikroplastik (65%) berwarna biru dan/atau bening, sedangkan warna umum lainnya adalah merah (15%) dan abu-abu (13%). Empat dari 20 sampel mikroplastik diidentifikasi sebagai polietilen (Panno *et al.*, 2019).

Untuk dapat menilai potensial risiko mikroplastik bagi kesehatan, maka konsentrasi dan jalur paparan perlu diketahui. Konsentrasi mikroplastik yang rendah ($0-7 \text{ partikel m}^{-3}$) dengan ukuran antara 50 dan 150 μm terdeteksi di air minum mentah dari sumur air tanah. Partikel-partikel ini diidentifikasi sebagai polietilen, poliamida, poliester, polivinilklorida atau resin epoksi. Terdeteksinya mikroplastik dalam air minum disebabkan oleh abrasi peralatan plastik yang digunakan selama pemurnian air atau transportasi (Mintenig *et al.*, 2019).

Air tanah juga rentan oleh mikroplastik yang bersumber dari air limbah dan industri. Konsentrasi tinggi mikroplastik berkisar antara 67 dan 11.532 partikel m^{-3} terdeteksi pada air permukaan di Belanda yang tercemar oleh tiga Instalasi Pengolahan Air Limbah. Secara total, 26 jenis polimer diidentifikasi

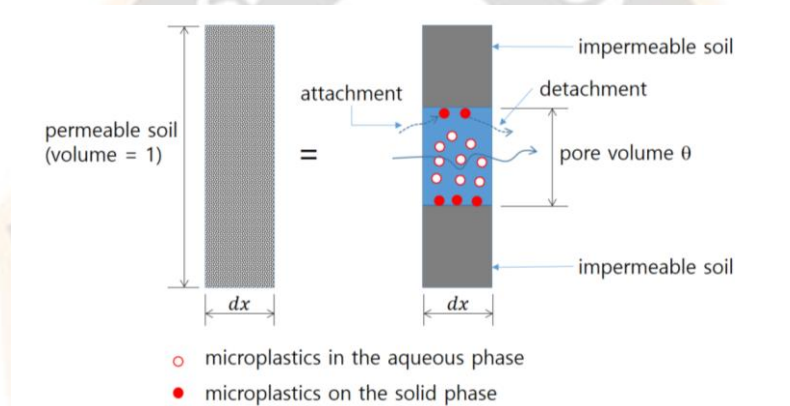
yaitu 23% polietilen, 19,7 % polypropylene dan 18,3% ethylene propylene diene monomer rubber. Keragaman jenis polimer tertinggi ditemukan untuk MP kecil, sedangkan MP yang lebih besar dari 1 mm langka dan hampir tidak ada (Mintenig *et al.*, 2020).

2.4 Pemodelan Migrasi Mikroplastik di Lingkungan Air Tanah

Kajian tentang serpihan halus (*debris*) mikroplastik di lingkungan, kebanyakan fokus pada studi tentang jenis, kejadian, dan distribusinya. Studi tentang metode pemodelan masih terbatas, biasanya berkonsentrasi pada aspek-aspek tertentu, seperti pengendapan atau bioakumulasi. Di beberapa negara, termasuk AS, Jerman, Kanada, dan Denmark, MP terdeteksi dalam air minum yang diperoleh dari air tanah. Mikroplastik sebanyak 30.000 skala pori (20 hingga 50 μm) terdeteksi di zona hiporeik di mana air permukaan dan air tanah bercampur secara aktif, dan kemungkinan MP memasuki air tanah melalui bagian pencampuran ini (Frei *et al.*, 2019). Kemungkinan masuknya MP ke dalam air tanah melalui tanah karena karakteristik tanah (pori-pori dan rekahan), aktivitas biologis, aktivitas manusia, dan curah hujan telah disarankan dalam studi tentang transportasi MP di tanah (Rillig *et al.*, 2017).

Penelitian pemodelan transportasi mikroplastik lebih banyak dilakukan di lingkungan laut, sungai dan danau, sedangkan studi pemodelan pada air tawar belum ada (Uzun *et al.*, 2022). Model yang digunakan untuk simulasi transportasi kontaminan zat terlarut dalam air tanah tidak cocok untuk mempelajari mikroplastik. Oleh karena itu, transportasi MP dalam media

berpori jenuh dimodelkan dengan sebuah persamaan (Ryu *et al.*, 2021). Pemodelan gerakan, ikatan dan pelepasan partikel dalam media berpori jenuh adalah subjek yang telah dibahas di banyak bidang penelitian. Studi sebelumnya didasarkan pada konsep keseimbangan massa, dan pemodelannya dijelaskan menggunakan persamaan kontinuitas. Konsep yang sama berlaku untuk pemodelan MP, dan beberapa peneliti telah mengadopsi model transportasi koloid (Dong *et al.*, 2018).



Gambar 2.1. Transportasi MP dalam Media Berpori Jenuh
(Sumber: Ryu *et al.*, 2021)

Saat MP mengalir melalui pori, dengan volume θ , di dalam tanah jenuh dengan volume 1, MPs mengambang di pori kemudian diangkut ke hilir oleh proses difusi dan adveksi. Beberapa MP di dalam pori-pori melekat pada permukaan partikel tanah, sedangkan sebagian MP yang menempel menjadi terlepas dari permukaan partikel tanah.

Persamaan neraca massa untuk MP ($C_t = C_{Mp}$) adalah sebagai berikut:

$$\frac{\partial C_t}{\partial t} = - \nabla \cdot \mathbf{f} \quad (1)$$

Mikroplastik bermigrasi melalui pori (θ)

$$Ct = \theta \cdot C + \rho \cdot S \quad (2)$$

$$f = -\theta \cdot D \cdot \nabla C + v \cdot \theta \cdot C \quad (3)$$

Keterangan:

Ct, C = konsentrasi mikroplastik dalam air ($\Sigma N/m^3$) atau kg/m^3

f = total fluks mikroplastik (N/m^2s)

S = mikroplastik fase padat (N/kg)

θ = kadar air volumetrik (-)

ρ = berat jenis tanah (kg/m^3)

D = difusivitas (m^2/s)

v = kecepatan air pori rata-rata (m/s)

$$\frac{N}{m^2 \cdot s} \approx - \left\{ \frac{m^2}{s} \cdot \left(\frac{N}{m^3} \right) + \frac{m}{s} \cdot \frac{N}{m^3} \right\}$$

Difusi dalam tanah mengikuti difusi Kmdusen:

$$f_D = -\theta \cdot D \left(\frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial C}{\partial y} + \frac{\partial C}{\partial z} \right) \rightarrow \text{Tiga dimensi arah x, y, z}$$

$f_b = \vartheta \cdot \theta \cdot C \rightarrow$ arah x, y, z $\rightarrow$ menyesuaikan mana yang dominan apakah diffusional transfer atau bulk transfer.

$$f = f_D + f_b = -\theta \cdot D \cdot \nabla C + \theta \cdot \vartheta \cdot C$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\theta \cdot C + \rho \cdot S) = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\theta \cdot D \cdot \frac{\partial C}{\partial x} + \vartheta_x \cdot \theta \cdot C \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\theta \cdot D \cdot \frac{\partial C}{\partial y} + \vartheta_y \cdot \theta \cdot C \right)$$

$$\theta \cdot \frac{\partial C}{\partial t} + \rho \cdot \frac{\partial S}{\partial t} = \theta \cdot D_x \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \theta \cdot \vartheta_x \cdot \frac{\partial C}{\partial x} + \theta \cdot D_y \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - \theta \cdot \vartheta_y \cdot \frac{\partial C}{\partial y}$$

$$\theta \cdot \frac{\partial C}{\partial t} + \rho \cdot \frac{\partial S}{\partial t} = \theta \cdot D_x \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \theta \cdot \vartheta_x \cdot \frac{\partial C}{\partial x} + \theta \cdot D_y \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial y^2}$$

Atau

$$\theta \cdot \frac{\partial C}{\partial t} + \rho \cdot \frac{\partial S}{\partial t} = \theta \cdot D_x \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \theta \cdot \vartheta_x \cdot \frac{\partial C}{\partial x} - \theta \cdot D_y \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial y^2}$$

Dengan mensubstitusi persamaan (2) dan (3) ke dalam persamaan (1) untuk aliran satu dimensi, maka akan diperoleh:

$$\theta \cdot \frac{\partial C}{\partial t} + \rho \cdot \frac{\partial S}{\partial t} = \theta \cdot D_x \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \theta \cdot v_x \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \quad (4)$$

MP dalam fase padat menggunakan model adsorpsi-desorpsi sebagai berikut:

$$\rho \cdot \frac{\partial S}{\partial t} = k_a \cdot \theta \cdot C - k_d \cdot \rho_b \cdot S \quad (5)$$

Keterangan:

k_a = koefisien adsorpsi orde pertama (1/s)

$$k_a = \frac{3(1-\theta)}{2d_{50}} \eta \alpha v$$

η = efisiensi kolektor (-)

α = efisiensi pelekatan mikroplastik (-)

d_{50} = median diameter butir media berpori (m)

k_d = koefisien desorpsi orde pertama (1/s)

ρ_b = bulk density

ρ_p = particle density

Jika k_d sangat kecil dibandingkan k_a sehingga persamaan (5) dapat disederhanakan sebagai berikut:

$$\rho \cdot \frac{\partial S}{\partial t} = k_a \cdot \theta \cdot C \quad (6)$$

berarti MP menempel kuat pada butiran tanah.

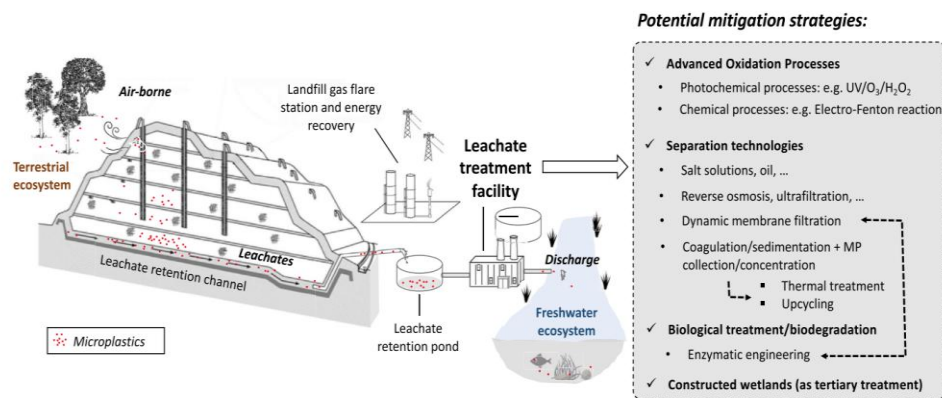
Hasil penelitian Ryu *et al.* (2021) menyarankan bahwa perlu untuk mengurangi difusivitas MP dan meningkatkan kecepatan aliran air, porositas, dan koefisien *attachment* orde pertama yang secara efektif mengandung potensi bahaya bagi lingkungan. Dari hasil simulasi, dapat dijelaskan bahwa kombinasi difusivitas yang rendah, kecepatan aliran air yang cepat, dan porositas tanah yang tinggi dapat mengurangi jumlah MP yang meresap ke lingkungan air tanah.

2.5 Strategi Mitigasi dan Remediasi Mikroplastik di TPA

Kerangka kerja pertama dan pemodelan matematika untuk menghitung kehilangan sampah plastik ke lingkungan dari fasilitas TPA, perlu mempertimbangkan tiga jalur utama (1) proses lingkungan, termasuk efek angin, banjir, dan curah hujan; (2) pengaruh biota terhadap pemindahan atau migrasi mikroplastik; dan (3) penyebab antropogenik yang relevan, mewakili pengaruh pemulung plastik. Namun, keberhasilan penerapan kerangka kerja ini memerlukan kumpulan data khusus, termasuk topografi atau medan TPA, komposisi fisik sampah kota, kondisi meteorologi dan atmosfer. Hal ini merupakan tugas yang menantang, khususnya di wilayah dengan ketersediaan informasi yang terbatas (Yadav *et al.*, 2020).

Jumlah mikroplastik umumnya lebih rendah dalam sampel lindi yang diolah, kondisi ini menunjukkan bahwa pengolahan lokal lindi di TPA dapat menjadi pilihan yang layak untuk mengurangi emisi mikroplastik baik ke IPAL atau lingkungan perairan (van Praagh *et al.*, 2018). Fasilitas pengolahan lindi TPA saat ini umumnya melibatkan satu atau beberapa pengolahan berikut ini: i) pengolahan biologis aerobik seperti laguna aerasi dan lumpur aktif; ii) perlakuan serupa tetapi di laguna anaerobik, reaktor; iii) perlakuan fisiokimia seperti pengupasan udara, penyesuaian pH, pengendapan kimia, oksidasi, dan reduksi; iv) koagulasi dengan kapur, aluminium (sulfat dan aluminium poliklorinasi), besi klorida, dan pengolahan tanah; dan v) teknik-teknik canggih seperti adsorpsi karbon, pertukaran ion, osmosis balik, bioreaktor membrane (Raghab *et al.*, 2013). Tetapi teknologi ini efektif hanya pada mikroplastik

ukuran yang lebih besar, sedangkan mikroplastik yang lebih kecil (di bawah 10 μm) masih belum jelas hingga pada akhirnya dapat menemukan jalan ke lingkungan.



Gambar 2.2 Sumber Mikroplastik dari TPA dan Potensi Strategi Mitigasi dan Teknologi yang dapat Diterapkan pada Fasilitas Lindi TPA
(Sumber: Silva *et al.*, 2021)

Beberapa teknologi yang memiliki potensi untuk diterapkan di fasilitas lindi TPA yaitu:

- (1) Mikroplastik berukuran kecil yang tidak tertahan oleh filtrasi pasir, filtrasi gravitasi, dan filtrasi tanah buatan sebagai perlakuan yang biasa diterapkan pada lindi, dapat dihilangkan dengan metode filtrasi seperti kombinasi filtrasi membran dan reaktor biologis pertumbuhan tersuspensi, yang menghilangkan 99,9 % mikroplastik dari air limbah.
- (2) Pemisahan densitas juga bisa menjadi pilihan, seperti aplikasi flotasi udara terlarut atau oli. Namun, karena sebagian besar mikroplastik dari lindi mungkin mengandung bahan kimia berbahaya yang teradsorpsi, penggunaan sekunder dan tujuan ulang (misalnya, daur ulang) dikompromikan. Namun demikian, konversi termokimia mikroplastik

menjadi minyak menggunakan air superkritis dalam kondisi proses yang dioptimalkan tampaknya sangat hemat energi dan menghasilkan emisi gas lebih rendah dibandingkan dengan proses insenerasi.

- (3) Mikroplastik dapat didegradasi oleh oksidasi elektrokimia, di mana radikal hidroksil dan zat pengoksidasi (misalnya, OCl , O_3 , dan H_2O_2) menyerang bahan polimer tersebut. Proses oksidasi lanjutan seperti foto-Fenton, O_3/UV , ultrasound (US), $\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$, UV/US , dan $\text{H}_2\text{O}_2/\text{US}$, juga dapat menghilangkan mikroplastik dalam lindi secara efisien (Canopoli *et al.*, 2020).
- (4) Teknik bioteknologi seperti rekayasa genetika dan pengembangan mikroba sintetis (dalam bioreaktor) juga sedang dieksplorasi. Banyak bakteri dan jamur, yang ditemukan di lumpur air limbah, tanah, dan tempat pembuangan sampah, terbukti berhasil mendegradasi plastik sintetis yang bandel seperti polietilen dan polietilen tereftalat, karena adanya, misalnya, hidrolase, seperti lipase, karboksilesterase, kutinase, dan esterase. Lahan basah buatan juga dapat memberikan perlakuan tersier yang menarik untuk mikroplastik, sebagaimana terbukti untuk IPAL, di mana mikroplastik berhasil diambil dari media oleh invertebrata makro.