

Perkembangan Pengolahan Lindi TPA: Tinjauan

Candra Dwiratna W.¹, Hery Setyobudiarso²,
Sudiro³, Anis Artiyani⁴.

^{1,2,3,4} Program Studi Teknik Lingkungan ITN Malang

¹Candra_wulandari@lecturer.itn.ac.id, ²herysba@lecturer.itn.ac.id, ³sudiro_enviro@yahoo.com,
⁴anisartiyani@ymail.com

Info Artikel

Sejarah artikel:

Diterima 05, 02, 2024

Direvisi 15, 02, 2024

Diterima 20, 02, 2024

Kata kunci:

Lindi,
Pengolahan gabungan,
Pengolahan biologi, pengolahan
kimia-fisika, Membrane.

ABSTRAK

Metode landfill merupakan salah satu pengolahan sampah yang banyak digunakan, landfill merupakan proses pembuangan sampah ke dalam lubang rekayasa untuk biodegradasi komponen organik. Pembakaran terbuka dan pembuangan sampah tidak hanya berkontribusi terhadap emisi gas rumah kaca tetapi juga menghasilkan lindi. Lindi adalah cairan yang sangat tercemar mengandung ion anorganik, senyawa organik dan unsur beracun lainnya dalam konsentrasi tinggi. Karakteristik lindi bervariasi berdasarkan limbah padat yang heterogen dan biasanya tergantung pada komposisi campuran limbah, kondisi geografis, usia tempat pembuangan sampah/usia limbah yang ditimbun. Secara umum pengolahan lindi dapat di kelompokkan menjadi empat, pengolahan gabungan, pengolahan biologis, pengolahan kimia dan fisika serta teknologi membrane. Semakin bervariasi karakteristik lindi menuntut pengembangan penelitian dalam pengolahan lindi, terutama untuk bahan organik persisten. *Advanced oxidation processes* (AOPs) seperti fotokatalitik, elektro-oksidasi dan fenton merupakan metode pengolahan lindi yang menjanjikan dimasa mendatang.

1. PENDAHULUAN

Pertumbuhan jumlah penduduk berkontribusi pada peningkatan timbulan sampah. Timbulan sampah sangat mempengaruhi masalah lingkungan dan kesehatan masyarakat di seluruh dunia (De, 2017). Jumlah sampah yang dihasilkan dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk pola konsumsi, standar hidup, tingkat aktivitas komersial, dan musim (Sharholly, 2008).

Pengelolaan sampah kota mencakup semua kegiatan berikut: pengumpulan, transfer, pemulihan sumber daya, daur ulang, dan pengolahan. Melindungi kesehatan masyarakat, meningkatkan kualitas lingkungan, mendorong keberlanjutan, dan meningkatkan output ekonomi adalah tujuan utama dari pengelolaan sampah (Henry, et al., 2006).

Asia terdiri dari negara maju dan berkembang, negara-negara berkembang di Asia memiliki tingkat pertumbuhan penduduk perkotaan tahunan sekitar 4%. Asia memiliki kesulitan dalam mengelola sampah kota, hal ini disebabkan sebagian besar negara di Asia mengalami urbanisasi sangat cepat dengan peningkatan populasi berkisar antara 30 hingga 50% (Othman, et al., 2012). Peningkatan pertumbuhan penduduk perkotaan menyebabkan peningkatan konsumsi pangan, pembangunan ekonomi, urbanisasi, dan industrialisasi. Hal tersebut merupakan kontributor utama peningkatan sampah perkotaan (Ayilara, et al., 2020). Negara-negara Asia menghasilkan sekitar $4,4 \times 10^9$ t / y limbah padat per tahun dan menghabiskan sekitar 25 M US \$ per tahun untuk pengelolaan sampah (Mostakim, 2020). Dalam 50 tahun terakhir, populasi dunia telah meningkat dari sekitar 3 miliar menjadi >7 miliar. Angka ini diperkirakan akan mencapai sekitar 8,6 miliar pada tahun 2030 dan 9,8 miliar pada tahun 2050 (Perserikatan Bangsa-Bangsa, 2023). Karena adanya peningkatan populasi, jumlah sampah yang dihasilkan diperkirakan akan meningkat dari sekitar 1,2 miliar Mg pada tahun 2010 menjadi sekitar 2,2 miliar Mg pada tahun 2025 (Di Maria et al., 2018).

Lindi merupakan air limbah dengan konsentrasi tinggi dengan karakteristik yang kompleks, lindi dapat mengandung bahan tersuspensi dan terlarut seperti logam berat, garam anorganik, nutrisi, kontaminan mikroba dan berbagai senyawa organik yang dikeluarkan dari penguraian sampah dari timbunan sampah di TPA (Arunbabu et al., 2017; Wdowczyk et al., 2022). Resiko pencemaran lingkungan akibat lindi dapat terjadi pada air tanah, badan air permukaan serta tanah (Ashraf et al., 2019). Tempat pembuangan sampah kota dianggap sebagai sumber kontaminasi bagi air tanah karena kebocoran lindi, campuran polutan kompleks yang konsentrasi COD tinggi, kandungan nitrogen amonium tinggi, kandungan logam berat tinggi dan karakteristik toksikologi (Li et al., 2014; Teta et al., 2017).

Teknologi pengolahan lindi yang dikembangkan saat ini, utamanya untuk mengolah zat organik misalnya, asam volatil, tetapi juga mempertimbangkan pengolahan Amonia. Namun, polutan organik lindi konsentrasinya sangat tinggi dan berbeda dalam tipologinya, membuat pengolahannya sangat sulit (Ganarathne, 2024). Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) adalah sumber utama senyawa xenobiotik. Komposisi senyawa xenobiotik juga bervariasi dengan usia, komposisi limbah dan teknologi TPA. Hidrokarbon monoaromatik seperti benzena, xilena, toluena, etilbenzena dan hidrokarbon terhalogenasi seperti trikloroetilena dan tetrakloroetilen paling banyak ditemukan di lindi TPA. Sebaliknya, fenol dan kresol ditemukan dalam konsentrasi kecil (dalam μgL^{-1}) (Khasawneh, 2022). Dengan perkembangan populasi yang diikuti dengan perubahan pola konsumsi di masyarakat, menyebabkan karakteristik lindi juga berubah. Adanya polutan mikro seperti xenobiotik yang terdapat dalam lindi, maka dibutuhkan sistem pengolahan lindi yang lebih baik untuk mengatasi permasalahan tersebut.

2. METODE

Makalah ini, Perkembangan Pengolahan Lindi TPA disusun melalui tinjauan literatur tentang penelitian dan juga studi kasus terdahulu. Pencarian jurnal maupun studi kasus menggunakan berbagai kata kunci digunakan dalam database. Artikel ilmiah yang digunakan sebagai data berupa artikel dari jurnal, prosiding, naskah repository. Waktu publikasi dibatasi antara tahun 2018- 2024. Referensi yang digunakan menggunakan pencarian data pada website pencarian yaitu <https://scholar.google.com>, <https://sinta.kemdikbud.go.id>, serta <https://www.sciencedirect.com>. Tahapan pencarian data artikel dimulai dari:

1. Mengetikkan alamat pada kolom <https://scholar.google.com>, <https://sinta.kemdikbud.go.id>, serta <https://www.sciencedirect.com> pencarian.
2. Mengetikkan kata kunci pencarian *guided inquiry* sampah, *guided inquiry* lindi, *guided inquiry* metode pengolahan lindi, dan *guided inquiry* metode pengolahan lindi masa depan pada kotak pencarian *website*.
3. Kemudian artikel ilmiah yang sudah ditemukan, masuk ke tahap filterisasi dengan mengeliminasi artikel ilmiah berdasarkan kriteria topik bahasan pada artikel berupa sampah, lindi *guided inquiry* dan membahas pengolahan lindi. Selain itu, artikel ilmiah juga diseleksi berdasarkan 10 tahun terakhir yakni rentang tahun 2018–2024. Filterisasi ini bertujuan untuk mengurangi kemungkinan artikel yang rangkap dari berbagai sumber *website*.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Artikel yang telah didapat melalui kata kunci pencarian pada tiap *website* setelah dilakukan filterisasi dan direview, berikut hasil review di jelaskan pada bagian bawah ini.

3.1. Sampah

Sampah merupakan limbah padat hasil kegiatan manusia atau alam yang tidak bermanfaat lagi, dapat juga diartikan sampah adalah zat yang dihasilkan oleh aktivitas manusia dan/hewan yang dibuang karena tidak berharga atau tidak diinginkan (Khajuria, et.al., 2010). Limbah padat adalah produk sampingan dari aktivitas manusia yang diperkirakan akan meningkat seiring pertumbuhan populasi, urbanisasi, standar hidup, dan perubahan pola konsumsi (Awasthi, et.al., 2023). Pengolahan sampah yang tidak sehat akan berdampak pada lingkungan, tiga dampak pengolahan sampah antara lain: dampak pada fungsi ruang dan teritorial, dampak pada hukum dan politik serta dampak pada sosial (Arteaga, et.al., 2023). Permasalahan utama sampah adalah masalah kemanusiaan, terutama pada perkotaan (Siddiqua et al., 2022). Sebagian besar sampah kota berasal dari rumah tangga dengan persentase sebesar 55-80%, prosentase kedua dihasilkan oleh areal komersial atau pasar sebesar 10-30%, dan sisanya berasal dari industri, penyapuan jalan, institusi dan lain-lain (Miezah, et.al., 2010). Timbulan sampah yang dihasilkan kota Khulnam sebesar 1.000.000 kg/hari (Noman, et.al., 2023). Studi kasus di Cina menunjukkan bahwa komposisi sampah mempunyai tingkat kelembaban lebih dari 50% dengan dominasi sampah dapur dengan prosentase 52,8-65,3%, 3,5-11,9% kertas, dan 9,9-19,1% karet dan plastik (Ding, et.al., 2021). Hasil studi di Tulsipur Nepal di dapatkan bahwa sampah didominasi oleh sampah domestik sebesar 46%, dengan komposisi sampah sebagai berikut, 11% adalah kotoran dan puing-puing bangunan, 10% adalah plastik, 7% adalah kaca, 6% adalah kertas dan produk kertas, 5% adalah logam, dan 5% adalah karet dan kulit. Sisanya terdiri dari tekstil (1%), sampah berbahaya (1%), dan limbah lainnya (8%). Komposisi

limbah menunjukkan bahwa, sampah organik menjadi mayoritas dan produk yang dapat didaur ulang (Dangi, et.al.,2013).

Sampah yang dihasilkan oleh aktivitas manusia setiap tahunnya sekitar 1,3 miliar ton, akan meningkat menjadi 3,4 miliar ton pada tahun 2050 (Wang, Shuhua et al., 2020; Zhan et al., 2020). Sedangkan biaya pengelolaan sampah secara global, dipastikan akan meningkat sekitar \$375,5 miliar pada tahun 2025 (Samwine, et.al 2017). Negara-negara Asia menghasilkan sekitar $4,4 \times 10^9$ ton/ tahun sampah dan menghabiskan sekitar 25 M US \$ per tahun untuk pengelolaan (Hoorweg, 2012). Timbulan sampah rata-rata secara global sekitar 0,74 kg / Cap / hari, dan tingkat timbulan timbulan bervariasi dari satu negara ke negara lain, dari 0,11 hingga 4,54 kg / Cap / hari. Pada tahun 2025, timbulan sampah akan meningkat menjadi 2,2 miliar ton, dimana lebih dari sepertiga sampah tersebut masih belum terkumpul (Hoorweg dan Bhada-Tata, 2012).

Timbulan sampah meningkat seiring dengan peningkatan jumlah penduduk, dari hasil survey pada 173 negara di dapat hasil, setiap peningkatan penduduk 1% akan menimbulkan peningkatan timbulan sampah sebesar 0,2928% (Zambrano,2021). Sedangkan di China setiap peningkatan 1% penduduk akan meningkatkan volume sampah sebesar 0,313% (Cheng et.al, 2020). Peningkatan sampah dipengaruhi oleh perkembangan ekonomi, hal ini disebabkan meningkatnya ekonomi berdampak signifikan pada meningkatnya konsumsi yang berdampak pada meningkatnya volume limbah (Magazzino, et.al., 2022).

3.2. Pengolahan Sampah

Beberapa negara menerapkan pengelolaan sampah yang efektif, tahapan pengelolaan sampah terdiri (i) pengumpulan dan pemilahan sampah, (ii) penggunaan kembali dan daur ulang limbah, (iii) recovery, dan (iv) pembuangan akhir sampah, setiap tahap memegang peranan penting dalam kesuksesan sistem pengelolaan sampah (Sondh, 2024). Sistem pengelolaan sampah di Indonesia sesuai SNI 19-2454-2002, pemilahan sampah diharapkan dilakukan pada sumber sampah atau dapat dilakukan pada TPS/TPST sehingga sampah yang diangkut dan di proses pada TPA dapat berkurang. Tahapan pengelolaan sampah selengkapya dapat dilihat pada gambar 1 sebagai berikut.

Saat ini, ada tiga metode utama pengolahan limbah kota di Cina: insinerasi, TPA dan pengolahan biologis, di mana pengolahan hayati terutama mencakup pengomposan dan pengolahan anaerobik (Zhao et al., 2020).

Pengolahan sampah yang aman adalah menyimpannya pada tempat pembuangan sampah yang telah dirancang, dibangun dan dikelola dengan benar. Sebagian besar sampah dibuang ke tempat pembuangan sampah atau dibakar, sehingga berdampak negatif terhadap lingkungan. Selama proses dekomposisi sampah akan berdampak pada lingkungan antara lain kontaminasi air permukaan dan air bawah tanah selain itu dapat menghasilkan gas rumah kaca (misalnya, SO_2 , NO_2) (Islam et.al., 2019; Zhou et.al., 2020). Pembuangan sampah secara global menghasilkan sekitar 1600 Mt emisi GRK setara CO_2 pada tahun 2016, atau setara 3-5% dari emisi GRK global (Liu, et.al., 2023). Pengolahan sampah diproyeksikan akan menyumbang emisi yang meningkat menjadi sekitar 2,4 miliar ton setara CO_2 / tahun pada tahun 2050 (Kaza et al., 2018).

Metode landfill merupakan salah satu pengolahan sampah yang banyak digunakan, landfill merupakan proses pembuangan sampah ke dalam lubang rekayasa untuk biodegradasi komponen organik dari bahan limbah (Amin, et al., 2023). Penimbunan sampah merupakan salah satu metode pengelolaan sampah yang paling umum di dunia (Meys et al., 2020). Landfill merupakan tempat pembuangan akhir untuk beberapa limbah, dan lingkungan mikro landfill akan berubah dengan bertambahnya usia (Zhang, 2023).

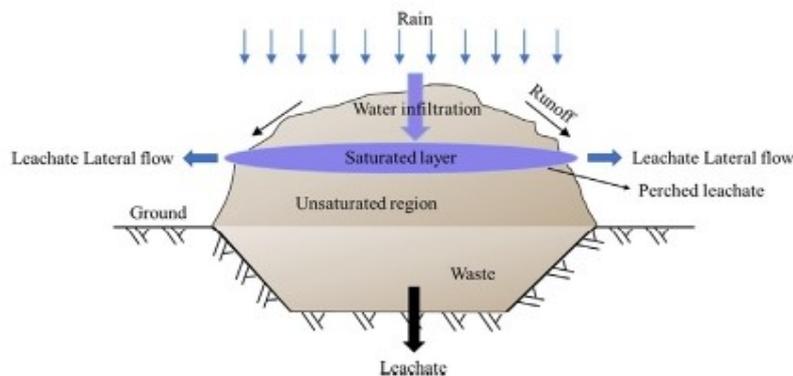
Landfill adalah struktur fisik yang digunakan untuk membuang sisa sampah, dimana sisa sampah di simpan pada permukaan tanah yang memerlukan sejumlah prosedur antara lain pemantauan aliran limbah, pembuangan sampah dan pemadatan, dan pemasangan stasiun pemantauan lingkungan di dalam dan sekitar TPA, termasuk pendekatan pengendalian pencemaran (Mor, 2023).

Pembakaran terbuka dan pembuangan sampah tidak hanya berkontribusi terhadap emisi gas rumah kaca tetapi juga menghasilkan lindi, lindi berbahaya bagi mikroba tanah selain itu juga meresap jauh ke dalam air tanah. Perkolasi lindi ke dalam air tanah mempengaruhi kualitas air secara keseluruhan, air tanah jika dikonsumsi untuk kebutuhan sehari-hari dapat mengakibatkan bahaya kesehatan yang serius (Masters, 2014; Choudhury et al., 2021).

Disisi lain naiknya nilai jual tanah dan urbanisasi mempersulit kota untuk mendapatkan ruang yang sesuai untuk mengembangkan TPA baru (Shyamalet al., 2022). Meskipun pemerintah kota telah berkomitmen dalam hal pembiayaan. Kota-kota di India masih belum dapat melaksanakan pengelolaan sampah dengan baik, sekitar 70-90% dari sistem pengelolaan sampah yang ada masih belum dipisahkan dan dibuang di tempat pembuangan terbuka atau daerah dataran rendah (Mandal, 2019).

3.3.Lindi

Lindi adalah cairan yang sangat tercemar mengandung ion anorganik, senyawa organik dan unsur beracun lainnya dalam konsentrasi tinggi seperti logam berat dan amonia (Jayawardhana et al., 2016). Lindi yang dihasilkan di tempat pembuangan sampah perkotaan dapat menyebabkan pencemaran lingkungan jika tidak dikendalikan dan diolah secara efektif (Ehrig dan Stegmann, 2019). Lindi dapat dilarutkan oleh air hujan atau dilarutkan oleh air permukaan selama penimbunan sampah serta selama fermentasi, proses seperti pelapukan fisik dan erosi tanah dapat mempercepat jumlah kontaminan yang masuk ke badan air (Chen et al., 2021). Lindi adalah cairan yang dihasilkan dari perkolasi air hujan melalui sampah. Selain itu, air yang melekat dan reaksi baik secara fisikokimia dan biologis, sehingga komponen sampah terskstraksi. Komponen sampah tersebut akan terlarut dan tersuspensi dalam lindi. Secara fisik lindi TPA ditandai dengan bau yang menyengat (Ismail, et.al., 2016). Proses terjadinya lindi dapat dilihat pada gambar 2 berikut.



Karakteristik lindi bervariasi berdasarkan limbah padat yang heterogen dan biasanya tergantung pada komposisi campuran limbah, kondisi geografis, usia tempat pembuangan sampah/usia limbah yang ditimbun. Komposisi dan mineralisasi lindi dipengaruhi oleh lingkungan fisikokimia dan aktivitas mikroba dalam transformasi senyawa organik dan anorganik (Naveen et al., 2017). Karakteristik lindi sering menunjukkan konsentrasi substansial dari berbagai unsur, termasuk COD, padatan tersuspensi / terlarut, amonia, fosfor, nitrogen, karbon, garam anorganik, dan logam berat (Aziz, 2011). Lindi termasuk dalam limbah yang berbahaya bagi lingkungan, hal ini disebabkan adanya polutan dengan konsentrasi yang tinggi, baik yang bersifat biodegradable maupun nonbiodegradable, antara lain bahan organik, logam berat, senyawa nitrogen (terutama nitrogen amonia), beraneka ragam ion (misalnya, klorida, karbonat, dan sulfat), dan polutan organik persisten (POPs) (Bandala, 2021). Secara spesifik karakteristik lindi dari beberapa TPA dapat dilihat pada table 1 berikut.

Tabel 1. Karakteristik Lindi dari beberapa Negara

No	Karakteristik	Negara	Sumber
1	Total Solids 23.97 g L-1 COD 4827 mg L-1 TOC 742 mg L-1 BOD ₅ 650 mg L-1 NH ₃ -N 1140 mg L-1 NO ₃ -N 7.08 mg L-1 NO-N 0.13 mg L-1 Total Nitrogen (TN) 1320 mg L-1 PO ₄ -P 4.47 mg L-1 Total Phosphorus (TP) 18.8 ± 0.2 mg L-1	St. John the Baptist Wastewater Treatment System (LaPlace, LA, USA)	Selvaratnam, T. et.al., 2022
2	Ammonia as TKN 2279.2 ADMI NH ₃ -N 417.2 mg/L TSS 10,220 mg/L Turbidity 2388 mg/L BOD ₅ 9092 mg/L COD 45,164 mg/L BOD ₅ /COD 0.2 – mg/L Lead (Pb) ND < 0.01 mg/L Fluoride (F) ND < 0.01 mg/L Copper (Cu) 0.01 mg/L	Malaysia	AbdulKadir, et.al., 2023

	Nickel (Ni) 0.06 mg/L Zinc (Zn) 0.08 mg/L Nitrate (NO ₃) 1050 mg/L Phosphate (PO ₄ ³⁻) 46 mg/L		
3	PH 7.0 - 7.8 Conductivity 40921 µs/cm TDS 27452 mg/l Chlorides 11387 mg/l TSS 12985 mg/l COD 15629 mg/l BOD 10824 mg/l Total nitrogen 583 mg/l Ammonia-N 321 mg/l Nitrate-N 1.4 ± 0.2 mg/l Sulfates 596 ± 87 mg/l Phosphates 0.37 mg/l Nickel 0.096 mg/l Lead 0.019 mg/l Copper 0.074 mg/l Manganese 0.839 mg/l Chromium 0.062 mg/l Cadmium 0.094 mg/l Zinc 0.749 mg/l Iron 6.314 mg/l	Alexandria, Mesir	El-Salam, 2014
4	BOD 211 mg/L COD 800 mg/L PO ₄ ³⁻ 5.42 mg/L Ammoniacal nitrogen 150 mg/L Ammonium nitrogen 1100 mg/L Total dissolved solids 11.84 g/L Salinity 14.37 % Alkalinity 1700 mg/L Cl 10,000 mg/L Na 1500 mg/L K 2710 mg/L Hg 5.9 mg/L Pb 5.15 mg/L Cd 4.66 mg/L Zn 4.88 mg/L Ni 4.42 mg/L Cu 4.44 mg/L Cr 3.78 mg/L Fe 11.09 mg/L S 17.54 mg/L Ca 1.5 mg/L Mg 3.26 mg/L	Istanbul Turki	Khazada, 2020
5	Temperatur 22,5 °C pH 8,3 Conductivity 3150 µs/cm Alkalinity 1414 mg CaCO ₃ /l Cl 288 mg/l Hardness 702 mg CaCO ₃ /l Na ⁺ 345 mg/ NO ₂ -N 2,8 mg/l COD 378 mg O ₂ /l BOD 39,1 mg O ₂ /l	Landfill Villa Dominico, Buenos Aires. Argentina	Silvestini, 2019
6	pH 7,1-8,2 Temperatur 29 °C EC 1,39-3,01 (ms/cm) COD 1.250-5320 mg/L	Landfill Dompe, Sri lanka	Lindamulla, 2022

	BOD5 22,1- 68,1 mg/L S 0-40 mg/L Nitrit 30-300 mg/L Nitrat 0-31 mg/L Phosphat 2,8-8,5 mg/L TOC 30-95 mg/L TN 21-187 mg/L BOD5/COD 0,008-0,036		
7	pH 9,43 BOD 230 mg/L COD 662,256 mg/L TSS 64 mg/L N Total 3,5658 mg/L Timbal 4,52 mg/L Besi 2,13 mg/L	TPA Tanjungrejo Kudus Indonesia	Ramadhani, 2019

Karakterisasi lindi berfungsi sebagai pedoman untuk pelaksanaan prosedur pengolahan lindi yang tepat (Hussein, 2019). Secara umum, kualitas lindi TPA bergantung pada dua faktor penting, yaitu komposisi sampah yang tertimbun dan umur TPA (Palasari, 2019). Berdasarkan klasifikasi umur TPA, TPA berumur kurang dari 5 tahun masih muda, TPA berumur antara 5 dan 10 tahun berusia paruh baya, dan TPA berumur lebih dari 10 tahun TPA tergolong tua (Ghost, 2017). Karakteristik Lindi pada TPA muda terutama terdiri dari bahan organik hidrofilik dengan berat molekul rendah, dengan nilai pH rendah dan indeks biodegradabilitas tinggi (BOD5 / COD). Sebagai perbandingan, konsentrasi *Humic Acid* dan *Fulvic Acid* dengan berat molekul tinggi adalah komponen dominan lindi TPA tua, hal ini yang menyebabkan meningkatkan nilai pH dan indeks biodegradabilitas rendah. Sehingga konsentrasi logam berat cenderung menurun seiring bertambahnya usia, karena peningkatan nilai pH mengurangi kelarutan logam (Teng, 2021).

3.4. Dampak lindi pada lingkungan

Lindi mempunyai dampak yang signifikan terhadap lingkungan (Essien et al., 2022), dampak utama lindi pada lingkungan yaitu dapat mencemari air tanah dan air permukaan. Hal ini disebabkan lindi dapat mempengaruhi sifat fisikakimia, biologi dari air tanah (Anand et al., 2021). Lindi dapat juga berdampak pada kesehatan manusia, jika air minum terkontaminasi lindi dapat menyebabkan berbagai dampak Kesehatan, seperti gangguan neurologis, pernapasan serta pencernaan. Lindi juga menghasilkan bau yang tidak sedap yang dapat mengganggu kenyamanan bagi masyarakat yang tinggal dekat TPA (Gunarathne, et al., 2024). Gas volatile yang dihasilkan lindi dapat menyebabkan iritasi pada sistem pernapasan. Selain itu kontaminan dari TPA dapat juga masuk pada rantai makanan (Parvin, et al., 2021).

Tanah merupakan salah satu komponen lingkungan yang dapat terdampak oleh lindi, bukan hanya tanah tetapi juga mikroorganisme tanah (Teng et al., 2021). Perubahan tanah akibat tercemar oleh lindi dapat di evaluasi dengan melihat perubahan aktivitas enzim tanah, populasi mikroba, serta struktur tanah. Selain juga dampak polutan organik dan logam berat (Kandziora et al., 2021). Hasil penelitian Kooch, 2023, disimpulkan bahwa lokasi pengambilan sampel tanah sangat berpengaruh terhadap kelimpahan mikroorganisme tanah, dalam hal ini diwakili oleh tiga kelompok cacing tanah seperti: Collembola, Nematoda, Acarina, protozoa, jamur dan bakteri. Semakin dekat dengan lokasi TPA kepadatan dan jenis mikroorganisme semakin rendah. Selain itu lindi dapat meningkatkan iklim mikro tanah (termasuk kelembaban dan suhu tanah), sehingga menurunkan kualitas tanah dan meningkatkan rasio C/N (Yeilagi et al., 2021).

Salah satu indikator terjadinya pencemaran tanah akibat lindi dapat dilihat dari nilai resistivitas lapisan tanah. Nilai resistivitas tanah merupakan indikator penting yang secara tidak langsung menentukan sifat kimia dan fisik tanah seperti : salinitas, kelembaban, porositas, tekstur tanah, kepadatan serta kandungan bahan organik (Bashir et al, 2014; Aloa et al., 2022). Reaksi kimia yang terjadi selama proses dekomposisi menyebabkan tergerusnya lapisan tanah hal ini juga dipengaruhi oleh adanya logam berat dalam lindi. Rendahnya nilai resistivitas tanah dapat membuka jalan bagi lindi untuk merembes ke bawah tanah sehingga mencemari air tanah (Aloa, 2023).

Komposisi terbesar sampah merupakan bahan organik, pada proses dekomposisi akan menghasilkan metana. Gas metana dapat dilepaskan ke atmosfer jika kondisi ventilasi TPA buruk dapat menyebabkan

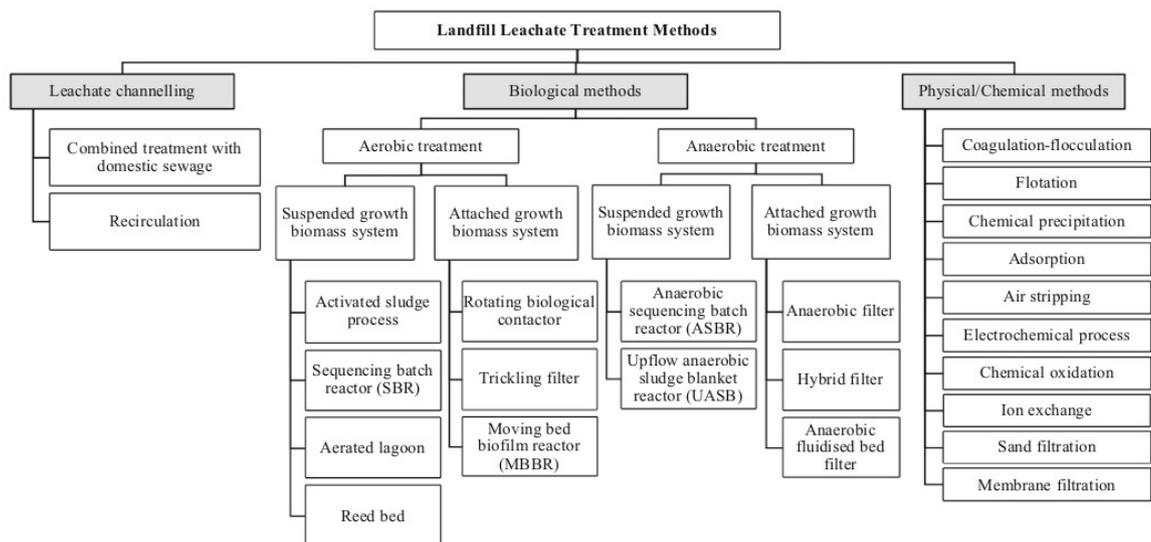
terjadinya ledakan (Abdel, et al.,2023). Selain berasal dari TPA metana dapat juga berasal dari pengolahan sampah illegal serta TPA dengan umur yang tua tanpa adanya pengelolaan yang baik. Untuk menghindari terjadinya ledakan, pembatasan konsentrasi metana terlarut di dalam lindi dapat diterapkan. Konsentrasi Metana terlarut dibatasi sebesar 0,14 mg/l (Abdel et al., 2002).

3.5. Metode pengolahan lindi

Secara umum pengolahan lindi dapat di kelompokkan menjadi empat, yaitu: (Abdel, et al.,2023, Kamaruddin, et al., 2017).

1. Pengolahan gabungan, metode pengolahan yang digunakan yaitu , dicampurkan dengan limbah rumah tangga atau daur ulang.
2. Pengolahan biologis, prinsip pengolahan ini berdasarkan bio-degradasi baik secara aerob maupun anaerob.
3. Pengolahan kimia dan fisika, yaitu Air Stripping, adsorpsi, oksidasi, koagulasi/ flokulasi, pengendapan dan flotasi.
4. Teknologi Membran.

Efisiensi pengolahan lindi secara konvensional sangat bervariasi, tergantung pada usia TPA. Pengolahan secara biologis efektif untuk mengolah lindi dengan usia muda (< 5 tahun), efektifitas akan menurun jika mengolah lindi TPA tua (>10 Tahun). Sedangkan metode pengolahan fisik-kimia, kerjanya lebih baik untuk pengolahan lindi TPA tua, tetapi beberapa penelitian menyimpulkan teknologi nanofiltrasi dan reverse osmosis menunjukkan kinerja yang memuaskan untuk lindi usia muda maupun tua (Casto et al., 2019). Beberapa metode pengolahan lindi dapat dilihat pada gambar 3 berikut:



Gambar 3. Hirarki pengolahan lindi (Kamaruddin, 2017)

3.5.1. Pengolahan Gabungan

Pengolahan lindi dapat dilakukan bersamaan dengan limbah domestik, jika lokasi TPA dengan sistem pengolahan limbah domestik berdekatan. Metode pengolahan ini mempunyai kelemahan yaitu rendahnya efisiensi pengolahan. Hal ini disebabkan rendahnya biodegradabilitas lindi serta adanya logam berat pada lindi sehingga menghambat proses pengolahan. Untuk meningkatkan efisiensi pengolahan disarankan proporsi lindi lebih rendah dibandingkan dengan limbah domestik (Carvajal, 2019). Rasio terbaik antara lindi dengan air limbah domestik yaitu 1:9. Pada perbandingan ini di dapatkan hasil pengolahan yang memuaskan BOD dapat diolah sampai 90% sedangkan Nitrogen sebesar 50%. Peningkatan rasio lindi dapat menurunkan COD dan $\text{NH}_4^+\text{-N}$ pada limbah domestic. Penambahan PAC (*Powdered Activated Carbon*) dapat meningkatkan kualitas effluent (Deng, 2018). Metode pengolahan yang digunakan merupakan metode

konvensional, metode yang disarankan adalah SBR (*Sequencing Batch Reactor*). Metode ini terdiri dari serangkaian fase yaitu: pengisian, anoksik, oksik, dan pengendapan (Concreta, 2014). Metode resirkulasi lindi, lindi diresirkulaikan kembali pada areal penimbunan, lindi masuk pada tumpukan sampah untuk membantu meningkatkan dekomposisi dan dapat meningkatkan kualitas lindi (Komaruddin, 2017). Resirkulasi lindi terbukti meningkatkan kadar air, sehingga meningkatkan unsur hara serta enzim. Pada system anaerobic, resirkulasi dapat meningkatkan efisiensi pengolahan COD antara 63-70% (Ghost, 2017). Sistem ini juga dapat memperpendek waktu stabilisasi hingga 2-3 tahun. Kelemahan dari sistem resirkulasi adalah tingginya kadar asam organik yang menyebabkan turunnya pH hingga di bawah 5, sehingga menghambat proses metanogenesis. Meningkatnya volume lindi dengan jumlah yang besar dapat menyebabkan kejenuhan dan genangan (Ghost, 2017). Resirkulasi lindi TPA banyak digunakan dalam dekade sebelumnya karena mudah dalam pengoperasionalannya serta biaya operasional yang rendah. Frekuensi dan volume resirkulasi adalah faktor utama yang mempengaruhi efektivitas sistem ini. Namun, beberapa siklus resirkulasi dapat mengakibatkan akumulasi zat tahan api dalam lindi TPA, sehingga mempengaruhi stabilitas sistem TPA dan meningkatkan kesulitan pengolahan lindi TPA berikutnya (Chugh et al. 2016).

3.5.2. Pengolahan Biologis

Teknologi ini menggunakan mikroorganisme untuk mengubah bahan organik kompleks dalam lindi menjadi bahan organik sederhana atau bahan yang tidak beracun. Pengolahan secara biologis dapat digunakan sendiri atau digabungkan dengan pengolahan yang lain untuk meningkatkan kualitas efluen serta meningkatkan efisiensi pengolahan (Femina, et al., 2020). Keunggulan pengolahan biologi yaitu: metode operasional sederhana, biaya rendah, tetapi efisiensi akan turun jika mengolah lindi dengan konsentrasi bahan organik yang lebih besar dari 10.000 mg/l. Kondisi ini dapat terjadi pada TPA dengan umur pakai 0-2 tahun pada daerah tropis, sedangkan pada TPA di iklim sedang pada umur pakai 0-10 tahun. Kelemahan lainnya yaitu adanya Sianida yang tinggi, Kromium, Nikel serta Seng dapat menghambat pertumbuhan mikroorganisme Nitrifikasi (Brennan et al., 2016).

Pengolahan biologis dapat dibagi menjadi dua, yaitu pengolahan aerobik serta anaerobic. Dalam kondisi aerobik, mikroorganisme mengubah senyawa organik menjadi karbon dioksida (CO₂) dan lumpur, sedangkan dalam kondisi anaerobik mikroorganisme mengubah bahan organik menjadi biogas (misalnya, CO₂ dan CH₄) (Lebron, 2021). Berbagai metode yang dapat digunakan untuk pengolahan lindi TPA meliputi (i) lumpur aktif, (ii) *Aerated Lagoon*, (iii) *Rotating Biological Contractor* (RBC), (iv) *Trickling Filter*, (v) *Moving-Bed Biofilm Reactor* (MBBR), (vi) *Hybrid Bioreactor* (HBR), dan (vii) *Sequence Batch Reactor* (SBR) (Saxena, 2022).

Lumpur aktif merupakan salah satu teknologi mengolah lindi yang menjanjikan (Wang et al., 2018). Lindi matang diolah dengan metode lumpur aktif dengan tambahan jamur *Penicillium sp.*, didapatkan hasil yang memuaskan. COD yang diolah sebesar 40% sedangkan nutrient dapat turun optimal (Islam et al., 2020). Kelemahan system ini adalah rendahnya potensi penyisihan Nitrogen, produksi lumpur, kebutuhan listrik yang besar saat operasi (Torretta et al., 2017).

Aerated Lagoon's atau kolam stabilisasi merupakan salah satu alternatif pengolahan lindi TPA. Keunggulan pengolahan ini adalah mudah pengoperasionalannya, hemat biaya, dan efektif pada berbagai kondisi lingkungan (aerobik / anaerobik / fakultatif) (Luo et al., 2020). Pengolahan lindi skala pilot diuji coba, dengan menggunakan tiga kolam disusun seri yang dioperasikan selama 111 minggu. Hasil uji coba didapatkan efisiensi penyisihan NH₃-N sebesar 75-99%, COD 35-82%, dengan konsentrasi awal COD terlarut 1230 hingga 4020 mg/L (Martins et al., 2013). *Aerated Lagoon's* digunakan untuk mengolah lindi dengan periode aerasi 12 jam dan 18 jam, hasil pengolahan untuk BOD hingga 75% dan efisiensi penghilangan NH₃-N. Keseimbangan antara keanekaragaman mikroba dan lindi merupakan factor utama keberhasilan pengolahan. Mikroba utama yang ada dalam kolam stabilisasi adalah fitoplankton, bakteri nitrifikasi, dan organisme ciliate. Teknik pengolahan alami seperti kolam stabilisasi dan operasinya mencapai penghilangan nitrogen yang lebih tinggi daripada proses biologis lainnya (Jinadasa et al., 2018).

Rotating Biological Contractor (RBC) anoksik skala pilot dioperasikan selama 88 hari untuk mengolah lindi TPA, efisiensi pengolahan sebagai berikut, COD turun sebesar 85% dari konsentrasi awal 2278–7695 mg/L dan NH₃-N dapat turun sebesar 99% dengan konsentrasi awal 366–1444 mg/l (Song et al., 2020). *Trickling filter* digunakan untuk mengolah lindi TPA matang pada kondisi optimal (suhu: 30 °C dan hydraulic loading: 40 L/m³d), dapat mengolah COD, TN, NH₃-H, dan PO₄-P masing-masing sebesar 85%, 76%, 99% dan 96% (Zhu et al., 2021). Dapat disimpulkan dari penelitian ini bahwa *trickling filter* menunjukkan kinerja yang baik untuk mengolah lindi TPA dengan konsentrasi NH₃-N tinggi, tetapi kinerjanya terbatas untuk pengolahan COD (Saxena, 2022).

Bioreaktor hibrida (HBR) terdiri dari sistem aerobik dan anaerobik digunakan untuk mengolah lindi, dengan HRT 28-30 jam, laju aliran udara 1,7-2 L/menit dapat mengolah COD sebesar 90% dan NH₃-N sebesar 80% (Mirghorayshi et al., 2021). Anaerobic digester digunakan untuk mengolah lindi menengah dengan OLR 2,25 g / L / d dan HRT 15 hari, dapat mengolah COD antara 83-94%, dengan tingkat produksi metana 0,02 L/g COD terolah. Berbagai logam berat dapat diolah antara 88-99%.

Anaerobic digester adalah salah satu metode anaerobik tertua yang digunakan pada proses pengolahan air limbah. *Anaerobic digester* terdiri dari beberapa proses dekomposisi zat organik yang mudah terurai. Pengolahan lindi TPA menengah menggunakan *Anaerobic digester* pada OLR 2,25 g / L / d dan HRT 15 hari, dapat mengolah COD antara 83-94% dan tingkat produksi metana 0,02 L/g COD terurai. Berbagai macam logam berat juga secara efektif dihilangkan pada sistem ini, dengan tingkat pengolahan mulai dari 88% hingga 99%. Kelemahan pengolahan ini, pengolahan Amonia tidak efisien (Kheradmand, 2010).

3.5.3. Pengolahan Fisika-Kimia

Adsorpsi dapat digunakan untuk menghilangkan racun molekuler dan ionic baik dalam bentuk terlarut atau tersuspensi dalam lindi TPA. Mekanisme pengolahan melalui interaksi antara gugus fungsional permukaan yang aktif secara kimia dan bermuatan Listrik. Di dalam memilih adsorben sifat permukaan merupakan hal penting yang harus diperhatikan. Karbon aktif butiran dan bubuk (AC) merupakan salah satu adsorben yang banyak digunakan untuk pengolahan lindi TPA dan kombinasi AC dengan metode pengolahan biologis dan koagulasi-flokulasi juga merupakan salah satu alternatif pengolahan yang banyak digunakan (Deng et al., 2018). AC terbuat dari lumpur pengolahan ZnCl₂ berbentuk kubik, digunakan untuk mengolah lindi TPA dengan menyerap bahan organik terlarut (DOM), seperti garam, ion logam berat, dan senyawa organik lainnya (alifatik terklorinasi, dan pestisida) (Liu et al. 2015), pada kondisi optimal dapat menurunkan COD hingga 85,61% (Zeng et al. 2019). Zeolit digunakan sebagai adsorben pengolahan lindi lanjutan, hasil pengolahan dapat menurunkan konsentrasi COD sebesar 30% (Poblete et al. 2019). Biochar sebagai pengganti AC yang baik, biochar terbuat dari sekam padi digunakan untuk pengolahan lindi TPA, efisiensi pengolahan COD sekitar 80% (Luo et al. 2019)

Koagulasi-flokulasi (C/F) merupakan salah satu metode pengolahan yang efektif untuk lindi yang matang, juga terintegrasi dengan metode pengolahan yang lain seperti oksidasi lanjut secara efektif mengolah lindi TPA matang yang terintegrasi dengan metode kimia lain seperti oksidasi lanjut (Amor et al., 2015; Ghanbari et al., 2020). Selain C/F konvensional dikembangkan juga metode elektrokoagulasi, dimana elektroda pengorban digunakan untuk melepaskan koagulan aktif menggunakan arus listrik, keunggulan metode ini adalah mengurangi produksi lumpur dan kebutuhan reagen kimia (Perez et al., 2016; Apaydin et al., 2019). Selain itu penggunaan elektrokoagulasi efisien di dalam pengolahan COD, nutrisi termasuk N dan P, kekeruhan serta warna. Tetapi mempunyai kelemahan yaitu adanya reaksi reduksi yang menyebabkan Nitrat menjadi Amonia (Dia et al., 2018).

Ozonisasi dapat dikombinasikan dengan pengolahan fisik yang lain seperti elektrokimia/ O₃, O₃ / H₂O₂, O₃ / UV, dan O₃ / S₂O₈²⁻. Tujuan penggabungan pengolahan ini adalah meningkatkan kinerja pengolahan lindi (Ghahrchi et al., 2020). Biofilter dikombinasikan dengan pre-treatment FeO-O₃/H₂O₂ untuk mengolah lindi berumur menengah didapatkan efisiensi pengolahan untuk COD sebesar 43%. Penambahan FeO sebesar 0,6 g/L, H₂O₂ sebesar 1 mL/L, besaran generasi 26,80

mg/menit O₃. Ozonisasi menjadi pilihan yang cocok untuk pengolahan lindi, perlu dipastikan bahwa langkah-langkah pengolahan sesuai sehingga efisiensi dapat ditingkatkan (Wang *et al.* 2020).

3.5.4. Teknologi Membran

Teknologi membran misalnya mikrofiltrasi, ultrafiltrasi, nonafitrasi dan reverse osmosis banyak digunakan untuk mengolah lindi (Renou *et al.*, 2008) dengan efisiensi pengolahan yang tinggi terutama untuk pengolahan pendahuluan misal untuk mengolah bahan koloid tersuspensi dengan diameter 0,5-1 µm (Gao *et al.*, 2014). Selain itu dapat juga mengolah molekul dan partikel, COD, NH₄⁺-N, Cl⁻ dan Pb (Talalaj *et al.*, 2019). Kelemahan sistem ini adalah biaya operasional yang tinggi yaitu sebesar \$ 1,77-4,90 / m³. Konsumsi Listrik merupakan faktor utama tingginya biaya pengolahan (Chen *et al.*, 2021). Kelemahan lainnya adalah produksi membrane retentate yang mengandung bahan anion anorganik, logam berat serta bahan organik (Keyikoglu *et al.*, 2021). Kelemahan ini dapat diatasi dengan mengabungkan dengan koagulasi-flokulasi, ozonisasi atau oksidasi lanjut (Long *et al.*, 2017, Hou *et al.*, 2017, Keyikoglu *et al.*, 2021).

Ultrafiltrasi umumnya digunakan sebagai pengolahan pendahuluan dan dilanjutkan dengan reverse osmosis (RO), sedangkan Nano filtrasi efektif untuk mengolah kontaminan organik, anorganik serta mikroorganisme dengan batas molekul antara 200-2000 Da (Amaral *et al.* 2016). Nano filtrasi dikombinasikan dengan RO lebih hemat energi, karena kedua tahap dapat dioperasikan dalam kondisi tekanan yang lebih rendah (Ramaswami *et al.* 2018).

3.6. Pengolahan lindi di Indonesia

Menurut lampiran III Permen PU No 03/PRT/M/2013 metode pengolahan lindi yang dapat digunakan di Indonesia antara lain adalah:

- a) Kolam Anaerobik, Fakultatif, Maturasi dan Biofilter.
- b) Kolam Anaerobik, Fakultatif, Maturasi dan Landtreatment/Wetland.
- c) Anaerobic Baffled Reactor (ABR) dengan Aerated Lagoon.
- d) Proses Koagulasi - Flokulasi, Sedimentasi, Kolam Anaerobik atau ABR.
- e) Proses Koagulasi - Flokulasi, Sedimentasi I, Aerated Lagoon, Sedimentasi II.

Metode pengolahan lindi yang digunakan pada TPA di beberapa kota di Indonesia, disarikan pada tabel 2 berikut:

Tabel 2. Metode Pengolahan Lindi di Beberapa TPA di Indonesia

No	TPA	Sistem Pengolahan Lindi	Efisiensi	Sumber
1	TPA Translik Pasir Panjang	Kolam Stabilisasi (Anaerob), Kolam Fakultatif, Kolam Maturase, Wedland	BOD 97%	Hasanuddin, 2022
2	TPK Sarimutki Bandung	Kolam Stabilisasi - Bak Pengumpul - Kolam Anaerobic Buffle Reactor (ABR) - Kolam Aerobik, Kolam Sedimentasi dan Land Treatment	TSS (-318) – 11% pH (-6) – (-4) Cd (-100)- 50% BOD5 (-25) – 64% COD (-6) – 36% N Total 17-30 %	Safria, 2022
3	TPA Koya Koso, Kota Jayapura	Bak Pengumpul, Kolam Anaerobik, Kolam Maturasi, Kolam Fakultatif dan Kolam Wetland (FWSS)	BOD 80% TDS 80%	Abrauw, 2019
4	TPA Bestari, Kota Probolinggo	Pengumpul, UASB, Kolam Anaerobik, Kolam fakultatif, Kolam Maturasi, Wetland, Sedimentasi	COD 90% Cd ≤ 0,001 mg/L (memenuhi baku mutu)	Pradinda, 2020
5	TPA Piyungan Kabupaten Bantul, D.I.	Sedimentasi, Aerasi, dan Desinfeksi	TSS 56 %; BOD 82 %; COD 0 %;	Kartikasari, 2020

	Yogyakarta		TN 41,67%; Hg 14 %.	
6	TPA Jetis Kabupaten Purworejo	Kolam Anaerobik, Kolam Fakultatif, kolam Maturasi.	pH 8 BOD 40% COD 37% TSS 76% Residu Terlarut 99% N total 49% Bakteri Fecal coliform < 3 X 10 ³ Cd dibawah baku mutu Hg dibawah baku mutu	Widarti, 2018
7	TPST Bantargebang (IPAS 3)	Kombinasi Pengolahan Biologis, Fisika- Kimia (Aerasi, Koagulasi- Flokulasi, Sandfilter)	pH 6,7 BOD 95,28% COD 95,30% Hg 99,73%	Sari, 2024
8	TPA Ngipik, Kabupaten Gresik	Anaerobik Baffled Reactor (ABR), Kolam Aerasi Dan Wetland.	Suhu 33,1 pH 8,9 BOD 53,15% COD 15,08% TSS 55,26% Cd 28,81% Hg 100% N-Total 96,83%	Jauhary, 2023
9	TPA Griyomulyo, Kabupaten Sidoarjo	Kolam anaerobik, MBR IPL-Biologis (Sistem Wehrle), Wetland, dan sedimentasi	pH 8,16 TSS 91,11% Suhu 30,70 °C Conductivity 5250 (µS/cm)	Muna, 2023
10	TPA Regional Kebun Kongok Kota Mataram	Bak Pengendap Awal, Biofilter Anaerob Dan Aerob,	COD 62,37% BOD 95,30% TSS 58,85% pH 7 Cd < 0,00001 Hg < 0,00006	Widiyanti, 2023
11	TPA Gunung Panggung Kabupaten Tuban	<i>Anaerobic Baffled Reactor</i> (ABR), Kolam Fakultatif, Kolam Maturasi, <i>Wetland</i> , Dan Kolam Resapan.	BOD5 96% COD 87% TSS 58% Total-N 47%.	Rizqia, 2021

Metode pengolahan yang digunakan rata-rata sesuai dengan lampiran III Permen PU No 03/PRT/M/2013, yaitu menggunakan metode pengolahan secara biologis baik secara aerob maupun anaerob. Sebagian besar IPAL mampu mengolah lindi dan memenuhi standart baku mutu sesuai dengan Permen LHK No P.59/Menlhk/Setjen/Kum.I/7/2016 tentang Baku Mutu Lindi bagi Usaha dan/atau Kegiatan Tempat Pemrosesan Akhir. Beberapa parameter tidak memenuhi baku mutu disebabkan bagian IPAL kurang dalam perawatan, waktu detensi pengolahan tidak sesuai kriteria,serta melebihi kapasitas (Widiyanti, 2023. Jauhary, 2023, Pradinda, 2020). Waktu detensi yang singkat akan menyebabkan tidak optimalnya penyisihan BOD (Safria, 2022).

Paratemer pH masuk pada range netral, rata-rata usia TPA tergolong usia tua (> 10 tahun), pada TPA dengan usia tua memiliki pH netral. Pada usia landfill > 10 tahun timbulan sampah mengalami fase matanogenetik, asam lemak volatile (VTA) diubah menjadi biogas (CH₄ dan CO₂). Pada kondisi metanogenetik memiliki pH optimum 7 (Izzah, 2022).

Kadmium di TPA bersumber dari sampah plastik, residu cat dan baterai. Kadmium akan membentuk suatu molekul dengan mengikat senyawa lain berupa bahan anorganik seperti klorida dan karbonat (Akbar et al., 2020). Rendahnya konsentrasi Kadmium pada lindi di beberapa TPA

disebabkan karena sumber sampah di TPA di Indonesia Sebagian besar berasal dari domestik sedangkan sampah yang mengandung logam hanya sekitar 0,1%. (Safria, 2022). Seiring bertambahnya umur TPA menyebabkan turunnya konsentrasi logam berat, berkurangnya bioavailabilitas logam pada timbunan sampah karena terbentuknya system iikatan yang lebih besar di dalam komponen tersebut (Adelopo, et, al., 2018). Akumulasi Cd akan menurun seiring dengan meningkatnya pH ke basa. Pada sampah berumur ≥ 5 tahun kondisi pH berada sedikit di atas 7, kondisi inilah yang memungkinkan terjadinya penurunan konsentrasi Cd pada landfill berumur tua (Rahman, et, al., 2021).

Komposisi dan karakteristik lindi dipengaruhi oleh umur TPA, TPA dengan umur muda dengan umur kurang dari lima tahun memiliki karakteristik lindi dengan kandungan logam berat lebih tinggi dibanding dengan TPA berumur menengah atau tua. Hal ini dipengaruhi oleh pH lindi yang menyebabkan logam berat lebih mudah terlarut. Selama periode pengolahan sampah di TPA akan terjadi perubahan empat fase, yaitu: fase aerob, fase asetogenik, fase methanogenik serta fase stabilisasi, yang dapat mempengaruhi karakteristik lindi seperti pH, BOD, COD, NH₄-N, serta konsentrasi logam berat (Lindamulla, 2022).

3.7. Perkembangan metode pengolahan lindi

Peningkatan kesejahteraan masyarakat secara signifikan akan mempengaruhi tingkat konsumsi, sehingga berdampak pada tingginya timbunan sampah serta bervariasinya komposisi sampah. Jejak organik seperti senyawa pengganggu endokrin (EDC), Flalat, Polifluoroalkil (PFAS), Ester Organofosfat (OPE), Bisphenol obat-obatan dan produk perawatan pribadi ditemukan dalam konsentrasi yang tinggi pada lindi, tetapi dampak serta nasibnya di lingkungan sekitar TPA belum diketahui (Wang et al., 2021, Qi et al., 2018). Senyawa organik tersebut tetap ditemukan dalam lindi meskipun telah dilakukan pengolahan (Nika et al., 2020).

Sisi lain belum adanya kewajiban bagi pengelola TPA untuk mengolah senyawa organik tersebut. Baik untuk TPA yang beroperasi, baru ditutup maupun TPA modern (Propp et al., 2021). Kurangnya pengetahuan serta informasi tentang dampak jejak bahan organik terutama untuk bahan organik yang mengganggu endokrin belum diperhatikan. Beberapa tahun terakhir keberadaan Polifluoroalkil (PFAS) di lingkungan meningkat, hingga mencapai tingkat toksisitas yang mengkhawatirkan (Roth et al., 2020). Sumber utama PFAS adalah biosolid dari IPAL yang dibuang ke TPA. Terjadinya PFAS dalam biosolid pengolahan air limbah tidak hanya menantang program aplikasi lahan yang bermanfaat, tetapi juga metode penyimpanan yang tepat. Hal ini berkaitan dengan peluang adanya mobilisasi PFAS ke dalam tanah, dapat larut dalam limpasan atau mencemari air (Seiple et al., 2017). Di AS diperkirakan beban rata-rata PFAS sebesar 2749-3450 kg / tahun, dimana sekitar 467-587 kg masuk TPA (Lang et al., 2017).

Advanced oxidation processes (AOPs) merupakan salah satu metode pengolahan lindi yang menjanjikan terutama untuk senyawa organik merusak endokrin. Fotokatalitik, elektro-oksidasi, dan Fenton merupakan contoh pengolahan AOPs (Bandala, et al., 2020). Beberapa penelitian menggunakan metode AOPs mendapatkan hasil yang memuaskan untuk parameter dasar lindi (COD, TOC dan Nutrien). Tetapi kemampuan AOPs untuk mengolah PFAS belum banyak dilakukan penelitian. Hal ini merupakan peluang bagi peneliti untuk dikembangkan di masa yang akan datang (Mor, 2023).

4. KESIMPULAN

Lindi termasuk dalam limbah yang berbahaya bagi lingkungan, hal ini disebabkan adanya polutan dengan konsentrasi yang tinggi, baik yang bersifat biodegradable maupun nonbiodegradable, antara lain bahan organik, logam berat, senyawa nitrogen (terutama nitrogen amonia), beraneka ragam ion (misalnya, klorida, karbonat, dan sulfat), dan polutan organik persisten (POPs). Saat ini metode pengolahan lindi yang banyak dikembangkan yaitu,

1. Pengolahan gabungan metode ini lindi dapat diolah bersama dengan limbah domestik atau dapat diresirkulasikan pada tumpukan sampah. Kelemahan metode ini dapat meningkatkan bahan tahan api pada tumpukan sampah

2. Pengolahan biologi terdiri dari aerob dan anaerob efisiensi pengolahan hingga 100% untuk parameter COD, kelemahan sistem ini adanya logam berat yang merupakan inhibitor bagi mikroorganisme sehingga menurunkan efisiensi pengolahan.
3. Pengolahan kimia-fisika seperti adsorpsi dan koagulas-flokuasi, ozonisasi. Pengolahan kimia-fisika yang dilanjutkan dengan pengolahan biologis dapat meningkatkan efisiensi pengolahan.
4. Teknologi membrane misalnya mikrofiltrasi, ultrafiltrasi, nonafitrasi dan reverse osmosis digunakan sebagai pengolahan pendahuluan. Kelemahan metode ini tingginya biaya pengolahan, produksi membrane retentate yang mengandung bahan anion anorganik, logam berat serta bahan organik.
5. Metode pengolahan lindi yang digunakan di TPA di Indonesia antara lain: Kolam Stabilisasi (Anaerob), Kolam Fakultatif, Kolam Maturase, Wedland.

REFERENSI

- [1] A.B. Nabegu, An analysis of municipal solid waste in kano metropolis, Nigeria, *J. Hum. Ecol.* 31 (2010) 111–119.
- [2] AbduiKadir, Wan Aisyah Fadilah Wae, et.al., 2023. Landfill leachate treatment in Malaysia: Continuous circulation motion using mixed agricultural wastes with an open grid-like Luffa's configuration. *Journal of Water Process Engineering* Volume 56.
- [3] Abdel-Shafy, Hussein I et al., 2024. Landfill Leachate: Source, Nature, Organic Composition and Treatment: An Envirinmental Overview. *Juornal Ain Dhams Engineering*.
- [4] Abdel-Shafy, Hussein I et al., 2002. Water Issue in Egypt: Resource, Pollution and Protection endeavors, *Central Eurapean Journal of Occupational & Environ Medicine* Volume 8.
- [5] Abrauw, Albert Einstein Stevann, 2019. Studi Operasional Pengelolaan Limbah Cair Lindi (Leachate) Pada TPA Control Landfill Koya Koso, *Jurnal DINAMIS* Vol 1. No. 12.
- [6] Adelopo, A. O., et al., 2018. Multivariate Analysis of The Effects of Age, Particle Size and Landfill Depth on Heavy Metals Pollution Content of Closed And Active Landfill Precursors. *Waste Management*, 78.
- [7] Arunbabu, V., et al., 2017. Leachate pollution index as an effective tool in determining the phytotoxicity of municipal solid waste leachate. *Waste Manag.* 68, 329–336
- [8] A. Khajuria, Y. Yamamoto, T. Morioka, 2010. Estimation of municipal solid waste generation and landfill area in Asian developing countries, *J. Environ. Biol.* 31 (5) (2010) 649–654.
- [9] Ali, Munawar, 2023.
- [10] Aloa, Joseph Omeiza, 2023. Impacts of open dumpsite leachates on soil and groundwater quality. *Groundwater for Sustainable Development* volume 20.
- [11] Amin, N., et al., 2023. Municipal Solid Waste Treatment for Bioenergy and Resource Production: Potential Technologies, Techno-Economic-Environmental Aspects And Implications Of Membrane-Based Recovery. *Chemosphere* 323.
- [12] Amaral, M.C.S., et al., 2016. Pilot Aerobic Membrane Bioreactor and Nanofiltration for Municipal Landfill Leachate Treatment. *J. Environ. Sci. Health, Part A* 51.
- [13] Amor, C., De Torres-Socias, et al., 2015. Mature Landfill Leachate Treatment by Coagulation/Flocculation Combined with Fenton and Solar Photo-Fenton Processes. *J. Hazard Mater.* 286.
- [14] Anand, U. et al., 2021. Potential Environmental and Human Health Risks Caused by Antibiotic-Resistant Bacteria (ARB), Antibiotic Resistance Genes (Args) And Emerging Contaminants (Ecs) From Municipal Solid Waste (MSW) Landfill. *Antibiotics* 10, 374.
- [15] Apaydin, O., Ozkhan, E., 2019. Landfill Leachate Treatment with Electrocoagulation: Optimization By Using Taguchi Method. *Desalin. Water Treat.* 173.
- [16] Ashraf, M.A., et al., 2019. Treatment of Taman Beringin landfill leachate using the column technique. *Desalin. Water Treat.* 149.
- [17] Ayilara, M, et al., (2020), Waste management through composting: challenges and potentials, *Sustainability* 12.
- [18] Awasthi, Prakash, et al., 2023. Solid Waste Composition and Its Management: A Case Study Of Kirtipur Municipality-10. *Heliyon* Volume 9.
- [19] Bandala, Erick R, et.al.,2021. Emerging Materials and Technologies For Landfill Leachate Treatment: Acritical Review. *Environmental Pollution* Volume 291.
- [20] Brennan, R.B., et al., 2016. Management Of Landfill Leachate: The Legacy Of European Union Directives. *Waste Manag.* 55.
- [21] Cheng, J., et al., 2020. Analysis of The Factors That Affect The Production Of Municipal Solid Waste In China. *J. Clean. Prod.* 259.
- [22] Chen, Y., et al., 2021. Single-Use Plastics: Production, Usage, Disposal, And Adverse Impacts. *Sci. Total Environ.* 752.

- [23] Chen, W., et al., 2021. Application Of Membrane Separation Technology in The Treatment Of Leachate In China: A Review. *Waste Manag.* 121.
- [24] Chugh, S., et al., 2016. Effect Of Recirculated Leachate Volume on MSW Degradation. *Waste Manag. Res.* 16.
- [25] Choudhury, M., Jyethi, et al., 2021. Investigation of groundwater and soil quality near to a municipal waste disposal site in Silchar. *Int. J. Energy Water Resour.*
- [26] Costa A.M., Alfaia, et al., 2019. Landfill leachate treatment in Brazil – an overview. *J. Environmental Managemant Volume* 232.
- [27] Concreta, R C et al., 2014. Fisrt-Order Kinetics of Lnadfill Leachace Treatment in aPilot-Scale Anaerobic Sequenching Batch Biofilm Reactor. *Environmenthal Management Volume* 145.
- [28] Ding, Ying, et al., 2021. A Review of China’S Municipal Solid Waste, in: *Comparison with International Regions:Management and Technologies in Treatment and Resource Utilization*, vol. 293.
- [29] Di Maria, F., et al., (2018). Are EU waste-to-energy technologies effective for exploiting the energy in bio-waste? *Appl. Energy* 230, 1557–1572
- [30] Dangi, Mohan, et al., 2013. Characterization, generation, and management of household solid waste in Tulsipur, Nepal. *Habitat International Volume* 40.
- [31] Deng Y, Jung et al., 2018. Adsorption of UV-Sequenching Substances (UVQS) from Landfill Leachate with Activated Carbon. *Chemical Engineering Volume* 350.
- [32] De.R. G, S , et al.,(2017). Municipal solid waste in Brazil: a review, *Waste Manag. Res.* 35 (12).
- [33] Ehrig, H.J., Stegmann, R., 2019. Chapter 10.2 Leachate Quality, in: Cossu, R., Stegmann,R. (Eds.), *Solid Waste Landfilling: Concepts, Processes, Technologies.* Elsevier,
- [33] El- salam, et.al., 2014. Impact of Landfiil Leachate on The Groundwater Quality: A Case Stydy in Eqtypt. *Journal of Advamce Reseach,Volume* 6 Page 579-586.
- [34] Essien, J.P., et al., 2022. Occurrence and spatial distribution of heavy metals in landfill leachates and impacted freshwater ecosystem: an environmental and human health threat. *PLoS One* 17, e0263279.
- [35] Femina Carolin C etal., 2020. Analysis and Removel of Pharmaceutical Residues from Wastewater using Bioreactor: A Riew. *Environmental Chemistry Letters, Volume* 19.
- [36] Florez- Carvajal Elizabet, et al., 2019. Technologies applicable to The Removal of Heavy Metals from Landfill Leachate. *Environmental Science and Pollution Research. Volume* 26.
- [37] Ghanbari, F., et al., 2020. Efficient treatment for landfill leachate through sequential electrocoagulation, electrooxidation and PMS/ UV/CuFe2O4 process. *Separ. Purif. Technol.* 242.
- [38] Ghahrchi, M., et al., 2020. Electro-catalytic ozonation for improving the biodegradability of mature landfill leachate. *J. Environ. Manage.* 254.
- [39] Ghosh, I.S. Thakur, A. Kaushik, 2017. Bioassays for toxicological risk assessment of landfill leachate: a review, *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 141.