TA/TL/2025/2062

JURUSAN
TEKNIK LINGKUNGAN

TUGAS AKHIR

Kombinasi Pengolahan Biologis dan Fitoremediasi dalam Mendegradasi Mikroplastik Pada Pengolahan Air Limbah Lindi.

Nama Mahasiswa

Fathur Rachman (21513102)

Dosen Pembimbing:

Dr. Joni Aldilla Fajri, S.T., M.Eng.

Dr. Suphia Rahmawati, S.T., M.T.

Program Studi Teknik Lingkungan Program Sarjana

Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan

Universitas Islam Indonesia

2025

DEPARTMENT
ENVIRONMENTAL ENGINEERING

BACHELOR THESIS

Combination of Biological Treatment and Phytoremediation in Degrading Microplastics in Leachate Wastewater Treatment.

Student's Name

Fathur Rachman (21513102)

Supervisor:

Dr. Joni Aldilla Fajri, S.T., M.Eng.

Dr. Suphia Rahmawati, S.T., M.T.

Environmental Engineering Bachelor Program

Faculty of Civil Engineering and Planning

Universitas Islam Indonesia

2025

LEMBAR PENGESAHAN

TUGAS AKHIR

Kombinasi Pengolahan Biologis dan Fitoremediasi dalam Mendegradasi Mikroplastik Pada Pengolahan Air Limbah Lindi.

Tugas akhir ini disusun dan diajukan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Teknik (S.T.) pada Program Studi Teknik Lingkungan Program Sarjana Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia.

Nama Mahasiswa

Fathur Rachman (21513102)

Tugas akhir ini telah diuji pada tanggal 9 Oktober 2025 dan disetujui oleh:

14/10 25

Dr. Joni Aldilla Fajri, S.T., M.Eng. (Pembimbing 1)

17/10 25

Dr. Suphia Rahmawati, S.T., M.T. (Pembimbing 2)

Any Juliani, S.T., M.Sc.(Res.Eng.), Ph.D. (Penguji)

Mengetahui,
Ketua Prodi Teknik Lingkungan Program Sarjana

Any Juliani, S.T., M.Sc.(Res.Eng.), Ph.D.

PERNYATAAN

Saya, penyusun tugas akhir ini, menyatakan bahwa:

1. Karya tulis ini adalah asli dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar akademik apapun, baik di Universitas Islam Indonesia, maupun di perguruan tinggi lainnya.
2. Karya tulis ini merupakan gagasan, rumusan, dan studi saya sendiri, tanpa bantuan pihak lain, kecuali arahan dosen pembimbing.
3. Dalam karya tulis ini tidak terdapat karya atau pendapat orang lain, kecuali secara tertulis dengan jelas dicantumkan sebagai acuan dalam naskah dengan disebutkan nama penulis dan dicantumkan dalam daftar pustaka.
4. Perangkat lunak atau program komputer yang digunakan dalam tugas akhir ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab saya. Bukan tanggung jawab Universitas Islam Indonesia.
5. Tidak ada penggunaan kecerdasan buatan *(artificial intelligence*, AI) dalam penyusunan karya tugas akhir ini kecuali:
   a. untuk membantu dalam kadar yang wajar (seperti membantu mengoreksi, mencari ide, dan mencari referensi), dan
   b. tercantum dan dijelaskan perihal penggunaannya secara eksplisit di dalam karya tugas akhir ini.

   Implikasi dari penggunaan AI tersebut menjadi tanggung jawab saya sepenuhnya.
6. Pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya. Apabila di kemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, saya bersedia menerima sanksi akademik dengan pencabutan gelar yang sudah diperoleh serta sanksi lainnya sesuai dengan norma yang berlaku di perguruan tinggi.

Yogyakarta, tanggal submit TA

Yang membuat pernyataan,



Fathur Rachman

21513102

PRAKATA

Assalamu'alaikum warahmatullahi wabarakatuh

Dengan mengucapkan Syukur kepada Allah SWT atas segala rahmat dan hidayah Nya penulis telah diberi kemampuan untuk menyelesaikan penulisan laporan Tugas Akhir dengan judul "Kombinasi Pengolahan Biologis dan Fitoremediasi dalam Mendegradasi Mikroplastik Pada Pengolahan Air Limbah Lindi.", dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Strata-1 Teknik Lingkungan Universitas Islam Indonesia, D.I. Yogyakarta. Perkenankanlah penulis mengucapkan terimakasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada:

1. Kepada Allah SWT yang selalu memberikan rahmat-Nya, kesehatan, dan kelancaran sehingga penulis bisa mengerjakan dan menyelesaikan penyusunan laporan Tugas Akhir ini dengan lancar.
2. Bapak Iwan Afrizal dan Ibu Maryanti sebagai kedua orang tua penulis yang senantiasa memberikan segalanya untuk penulis dalam segi materi maupun waktu.
3. Septia Veronica,Wulan zahra sebagai kakak & adik beserta keluarga besar penulis yang menyemangati dan mendukung penulis saat perkuliahan hingga akhir.
4. Pembimbing Tugas Akhir bapak Dr. Joni Aldilla Fajri, S.T., M.Eng. dan ibu Dr. Suphia Rahmawati, S.T., M.T yang telah meluangkan waktunya untuk memberikan arahan, saran dan bimbingan agar Tugas Akhir ini dapat diselesaikan.
5. Ketua Program Studi Teknik Lingkungan Universitas Islam Indonesia, Ibu Any Juliani, S.T., M.Sc. (Res. Eng)., P h.D. sekaligus sebagai dosen penguji dalam tugas akhir ini.
6. Koordinator Tugas Akhir, Bapak Adam Rus Nugroho, S.T., M.T., Ph.D. dan Mas Heriyanto A.Md. selaku staf Program Studi yang senantiasa membantu dalam administrasi dan segala informasi.

7. Salah satu temen perempuan spesial,Anisa Utami yang selalu menemani dan menyemangati didalam segala proses di perkuliahan dan di kota Yogyakarta yang istimewa.
8. Teman - teman kelompok tugas akhir Lindi yang membantu selama Tugas Akhir berjalan.
9. Rekan-rekan Teknik Lingkungan angkatan 2021 & KBTL yang tidak dapat penulis sebutkan satu-satu yang sedang sama-sama berjuang memperoleh gelar sarjana.
10. Teman teman SPD dan Sekre PAK PRAM yang menjadi salah satu jadi bagian penulis selama didunia perkuliahan dalam kondisi apapun dengan seribu harapan.
11. Dan pihak lain yang membantu dalam menyelesaikan tugas akhir ini.

Semoga segala bantuan, bimbingan dan pengajaran yang telah diberikan kepada penulis mendapatkan imbalan dari Allah SWT. Penulis menyadari bahwa laporan Tugas Akhir ini masih banyak berbagai kekurangan. Hal ini tidak lain berasal dari keterbatasan pengetahuan dan kesalahan dari penulis. Oleh sebab itu, kritik dan saran yang bersifat membangun sangat diharapkan demi menyepurnakan laporan tugas akhir ini. Penulis berharap laporan tugas akhir yang telah disusun ini dapat bermanfaat bagi para pembacanya.

Wassalamu'alaikum warahmatullahi wabarakatuh

Sleman, 30 Juli 2025

Fathur Rachman

Kombinasi Pengolahan Biologis dan Fitoremediasi dalam Mendegradasi Mikroplastik Pada Pengolahan Air Limbah Lindi.

Mahasiswa : Fathur Rachman
NIM : 21513102
Program Studi : Teknik Lingkungan - Program Sarjana
Pembimbing : Dr. Joni Aldilla Fajri, S.T., M.Eng.

Abstrak

Air lindi merupakan cairan hasil tumpukan sampah yang mengandung berbagai polutan, termasuk mikroplastik, sehingga menjadi salah satu sumber utama pencemar lingkungan yang berdampak negatif pada tanah, ekosistem, dan kesehatan manusia.Tujuan Penelitian ini yaitu untuk mengetahui efektivitas dari pengolahan biologis dan fitoremediasi menggunakan reaktor *Constructed wetland* dalam penyisihan mikroplastik dan mengetahui jenis jenis mikroplastik.Metode yang digunakan yaitu perbandingan antara konsentrasi,kelimpahan dan penyisihan mikroplastik di inlet dan outlet masing-masing unit pengolahan biologis dan *wetland*. Penulis ingin melakukan penelitian parameter mikroplastik pada air lindi menggunakan *Mikroskop Trinokuler*, *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* di TPA Piyungan Yogyakarta.Mikroplastik yang ditemukan berupa fragmen, fiber, film, foam, dan pellet.bentuk yang paling dominan yaitu Fragment berjumlah 1335 partikel dan film 1140 partikel sedangkan jenis mikroplastik paling sedikit yaitu tingkat pertama yaitu jenis foam berjumlah 55 partikel kedua yaitu fiber berjumlah 121 partikel dan yang ketiga yaitu pellet berjumlah 128 partikel. Pada mikroplastik identifikasi jenis polimer yaitu PET,PC,PVC,*Polyester,*EVA.

Jumlah total mikroplastik dari masing-masing unit pengolahan, terdeteksi adanya tren penurunan jumlah mikroplastik dari Pada unit awal, yaitu Bak Penampung, teridentifikasi sebanyak 532 partikel yang kemudian mengalami penurunan pada unit Anaerobik menjadi 445 partikel (16%), serta

pada Clarifier menjadi 426 partikel(20%). Penurunan lebih besar terlihat pada unit FTW Bakteri dengan jumlah 313 partikel, yang menunjukkan efisiensi penghilangan sekitar 41% dibandingkan kondisi awal. Sementara itu, pada unit CW Bakteri justru masih ditemukan 440 partikel dengan efisiensi rendah (17%), sehingga kinerjanya tidak sebaik unit lain hal ini disebabkan karena adanya jumlah mikroplastik yang tinggi pada tanah *constructed wetland*. Sebaliknya, FTW Non Bakteri mampu menurunkan jumlah partikel menjadi 398 (25%), dan hasil terbaik ditunjukkan oleh CW Non Bakteri dengan jumlah akhir 225 partikel atau efisiensi penghilangan mencapai 58%.

Kata kunci: Air lindi, FTIR,Mikroplastik,*Constructed Wetland*, Mikroskop Trinokuler,Reaktor, TPA,*Typha Angustifolia.*

Combination of Biological Treatment and Phytoremediation in Degrading Microplastics in Leachate Wastewater Treatment.

Student : Fathur Rachman
Student Number : 21513102
Study Program : Environmental Engineering – Bachelor Program
Supervisor : Dr. Joni Aldilla Fajri, S.T., M.Eng.

Abstract

Leachate is a liquid resulting from a pile of waste containing various pollutants, including microplastics, making it one of the main sources of environmental pollution that has a negative impact on soil, ecosystems, and human health. The purpose of this study is to determine the effectiveness of biological treatment and phytoremediation using a Constructed wetland reactor in removing microplastics and to determine the types of microplastics. The method used is a comparison between the concentration, abundance and removal of microplastics at the inlet and outlet of each biological and wetland treatment unit. The author wants to conduct research to degrade microplastics in leachate using a Trinocular Microscope, Fourier Transform Infrared Spectroscopy at the Piyungan Landfill in Yogyakarta. The microplastics found are fragments, fibers, films, foams, and pellets. The most dominant form is Fragments totaling 1335 particles and films 1140 particles while the least type of microplastic is the first level, namely the foam type totaling 55 particles, the second is fiber totaling 121 particles and the third is pellets totaling 128 particles. In microplastics, the polymer types identified are PET, PC, PVC, Polyester, EVA.

The total number of microplastics from each processing unit, detected a decreasing trend in the number of microplastics from the initial unit, namely the Storage Tank, identified as many as 532 particles which then decreased in the Anaerobic unit to 445 particles (16%), and in the Clarifier to 426 particles (20%). A greater decrease was seen in the Bacterial FTW unit with a total of 313 particles, which showed a removal efficiency of around 41%

compared to the initial condition. Meanwhile, in the Bacterial CW unit, 440 particles were still found with low efficiency (17%), so its performance was not as good as other units this was due to the high number of microplastics in the constructed wetland soil. In contrast, the Non-Bacterial FTW was able to reduce the number of particles to 398 (25%), and the best results were shown by the Non-Bacterial CW with a final number of 225 particles or a removal efficiency of 58%..

Key words: Leachate, Microplastic, FTI-R, Constructed Wetland, Trinocular Microscop,Reactor,Landfill,Typha Angustifolia.

DAFTAR ISI

PRAKATA i
Abstrak iii
DAFTAR ISI vii
DAFTAR TABEL ix
DAFTAR GAMBAR x
DAFTAR LAMPIRAN xi
BAB I PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Perumusan Masalah 3
1.3 Tujuan Penelitian 3
1.4 Manfaat Penelitian 4
1.5 Ruang Lingkup 4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA 5
2.1 Air lindi 5
2.2 Mikroplastik 6
2.3 Proses pengolahan limbah 10
2.4 Penelitian Terdahulu 14
BAB III METODE PENELITIAN 16
3.1 Waktu dan lokasi 16
3.2 Alat dan Bahan 16
3.3 Alur Penelitian 17
3.4 Mekanisme Penyisihan 30
3.5 Analisis 30
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN 32
4.1 Karakteristik Air lindi 32
4.2 Identifikasi berdasarkan jumlah dan Jenis Mikroplastik Lindi 33
4.4 Efektivitas Reaktor dalam menghilangkan Mikroplastik 52

4.5 Analisis Mikroplastik dengan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) 55
BAB V PENUTUP 58
5.1 Kesimpulan 58
5.2 Saran 59
DAFTAR PUSTAKA 60
LAMPIRAN 65
RIWAYAT HIDUP 1

DAFTAR TABEL

Tabel 4. 1 Karakteristik air lindi TPA Piyungan 32
Tabel 4. 2 Karakteristik sampel pada lindi 20% 33
Tabel 4. 3 Identifikasi Karakteristik *Peak* FTIR pada Mikroplastik..... 56

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Tanaman Typha Angustifolia..... 13
Gambar 3. 1 Alur penelitian..... 17
Gambar 3. 3 Desain rangkaian reaktor 18
Gambar 3. 2 Gambar rangkaian reaktor..... 18
Gambar 3. 4 Alur Kulturisasi bakteri..... 21
Gambar 3. 5 Desain Reaktor *Floating Treatment Wetland* 22
Gambar 3. 6 Desain Reaktor *Constructed Wetland* 23
Gambar 4. 1 Jumlah Total Mikroplastik pada lindi 36
Gambar 4. 2 Grafik jumlah & jenis mikroplastik pada..... 38
Gambar 4. 3 Grafik jumlah & jenis mikroplastik pada..... 39
Gambar 4. 4 Grafik jumlah & jenis mikroplastik pada..... 40
Gambar 4. 5 Grafik jumlah & jenis mikroplastik pada..... 41
Gambar 4. 6 Grafik total jenis mikroplastik 43
Gambar 4. 7 Fraksi Jumlah mikroplastik berdasarkan ukuran 45
Gambar 4. 8 Persentase Fraksi Jumlah mikroplastik berdasarkan ukuran 45
Gambar 4. 9 Jumlah Berdasarkan Karakteristik *Constructed wetland* bakteri 20% 47
Gambar 4. 10 Jumlah berdasarkan karakteristik Constructed Wetland Non Bakteri 20% 48
Gambar 4. 11 Jumlah Berdasarkan Karakteristik Constructed wetland bakteri 100% 49
Gambar 4. 12 Jumlah Berdasarkan Karakteristik Constructed wetland nonbakteri 100% 50
Gambar 4. 13 Jumlah total dan perbandingan Mikroplastik pada tanah dan air lindi pada *constructed wetland* 20% dan 100% 51
Gambar 4. 14 Persentasi Removal mikroplastik..... 53
Gambar 4. 15 Grafik Gelombang..... 55

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 65
Hasil perhitungan Mikroplastik pada air lindi dengan kertas saring 212 um 65
Lampiran 2 66
Hasil perhitungan Mikroplastik pada air lindi dengan kertas saring 25 um 66
Lampiran 3 67
Hasil perhitungan Mikroplastik pada air lindi dengan kertas saring 11 um 67
Lampiran 4 68
Hasil perhitungan Mikroplastik pada air lindi dengan kertas saring 1,6 um 68
Lampiran 5 69
Hasil persentase removal mikroplastik pada reaktor 69
Lampiran 6 70
Hasil perhitungan Mikroplastik pada tanah *constructed wetland* bakteri .. 70
Lampiran 7 71
Hasil perhitungan Mikroplastik pada tanah *constructed wetland* nonbakteri 71
Lampiran 8 Hasil perhitungan Mikroplastik pada tanah *constructed wetland* bakteri 100%
..... 67
Lampiran 9 Hasil perhitungan Mikroplastik pada tanah *constructed wetland* non bakteri 100%
..... 68
Lampiran 10 Lokasi Pengambilan sampel
..... 71
Lampiran 11 Rangkaian Reaktor
..... 71

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Penggunaan barang berbahan dasar plastik kini semakin banyak digunakan oleh masyarakat Indonesia. Sebanyak 17,1% sampah plastik dihasilkan oleh masyarakat perkotaan di Indonesia setiap tahunnya (SIPSN KLHK, 2021). Sampah plastik akan membutuhkan waktu puluhan hingga ratusan tahun untuk dapat terurai di alam (Lusher et al., 2015). Sebanyak 53% sampah yang dihasilkan oleh masyarakat, diangkut dan dibuang ke Tempat Pembuangan Akhir (TPA) (Hariyanto, 2014). Sampah plastik yang tersusun dari polimer sintetis yang kuat pada akhirnya akan terus tertumpuk di TPA dan menimbulkan pencemaran lingkungan. Menurut Rillig (2012), sampah plastik yang berada di atas permukaan tanah berpeluang besar menjadi sumber mikroplastik di dalam tanah.

Mikroplastik merupakan permasalahan lingkungan yang termasuk dalam kategori sangat berpengaruh terhadap kelestarian lingkungan. Mikroplastik merupakan salah satu jenis sampah plastik yang memiliki ukuran lebih kecil dari 5 mm. Mikroplastik memiliki sifat persisten dan mengandung unsur kimia beracun atau karsinogenik. Senyawa tersebut dapat meresap ke dalam tanah melalui lindi dan masuk ke rantai makanan sehingga berdampak pada kesehatan manusia dan lingkungan,sedangkan Air lindi adalah air yang menimbulkan dampak pencemaran lingkungan yang dimana air lindi merupakan air yang dihasilkan dari tumpukan sampah yang mengandung berbagai macam polutan termasuk mikroplastik yang berdampak negatif pada lingkungan dan kesehatan manusia dan merupakan salah satu sumber utama mikroplastik di lingkungan. Mikroplastik merupakan polutan persisten yang banyak ditemukan pada lingkungan perairan, termasuk air lindi, serta berpotensi menimbulkan dampak ekologis dan kesehatan karena mampu mengadsorpsi polutan berbahaya dan masuk ke rantai makanan (Li et al., 2022).

Air lindi yang berasal dari TPA mengandung berbagai macam mikroorganisme, zat organik, maupun anorganik (Pusporini, 2016). Air lindi memiliki konsentrasi COD, BOD, amonia, maunpun logam berat yang tinggi.

Kandungan air lindi yang beragam dapat menyebabkan pencemaran jika masuk ke lingkungan. Air lindi menyebabkan pencemaran yang berdampak pada tanah dan kehidupan di dalamnya. Tanah merupakan tempat untuk hidup berbagai mikroorganisme yang melakukan berbagai macam kegiatan menguntungkan bagi kehidupan dan memungkinkan bagi kelanjutan siklus kehidupan makhluk alami (Sutedjo, 1991).

Salah satu metode pengolahan yang ramah lingkungan dan berkelanjutan adalah pengolahan biologis, yaitu dengan memanfaatkan aktivitas mikroorganisme dalam mendegradasi polimer plastik. Penelitian telah menunjukkan bahwa bakteri seperti *Pseudomonas stutzeri* dan *Bacillus circulans* mampu mendegradasi mikroplastik jenis *polietilen* (PE) dan *polistirena* (PS) melalui aktivitas *enzim oksidase* dan *hidrolase* yang dihasilkan (Setyorini et al., 2021; Isnugroho et al., 2023). Mekanisme degradasi umumnya diawali dengan pembentukan biofilm pada permukaan plastik, yang kemudian mempercepat fragmentasi serta pemecahan rantai polimer (Raddadi & Fava, 2019). Meskipun efektivitas pengolahan biologis dipengaruhi oleh jenis polimer, kondisi lingkungan, dan lama waktu kontak, berbagai studi menegaskan bahwa metode ini memiliki prospek menjanjikan sebagai alternatif pengurangan beban pencemaran mikroplastik di lingkungan perairan.

Selain itu, pengolahan dengan metode *constructed wetland* juga salah satu metode yang efektif yaitu pengolahan ini meniru dengan sistem alami dari tanaman untuk mengolah air limbah dengan melibatkan beberapa mekanisme proses seperti fisika, kimia, dan biologi. Beberapa mekanisme tersebut bertugas untuk menghilangkan beberapa konsentrasi dalam air limbah yang membahayakan makhluk hidup dan lingkungan. Beberapa variabel yang mempunyai pengaruh dalam lahan basah buatan antara lain media, tanaman, dan juga suhu (Fajariyah, 2017). *Constructed wetland* dibagi menjadi 2 aliran antara lain *surface* dan *subsurface.* Untuk tanaman pada *constructed wetland* dibagi menjadi 3 jenis tanaman yaitu tanaman yang mengapung pada permukaan, tanaman pada perakaran yang ada pada tanah, dan tanaman yang seluruh tanaman berada di bawah permukaan air (Sitoresmi, 2015).

Kelebihan metode lahan basah buatan antara lain pengolahan dapat dilakukan *in situ* akibatnya limbah mampu langsung diolah tanpa memindahkan limbah ke tempat lain. Metode ini dapat menurunkan konsentrasi COD sebesar 60-85%, konsentrasi TSS hingga mencapai 80%-95% dan juga dapat menurunkan konsentrasi nitrogen dan fosfor dalam air limbah. Untuk kekurangan metode ini harus ada pemanenan tanaman secara teratur supaya persen penyisihan pada tanaman dilakukan secara maksimal sehingga mengeluarkan biaya lebih untuk proses pemanenan. Dan pada spesies tanaman akan berbeda-beda tingkat penyisihan parameter (Parde et al., 2021). *Typa angustifolia* mempunyai tinggi sekitar yang dapat mencapai 1,5 m dengan batang yang bulat dengan akar berbentuk rimpang. Tanaman ini mampu digunakan sebagai bahan anyaman dengan daun yang dapat dibuat tikar (Ramadhani et al., 2019).

Penelitian ini perlu dilakukan agar mengetahui dan memahami apa permasalahan mikroplastik ini terhadap lingkungan,apa saja yang bisa tercemar dan apa efek dari hal ini, mengetahui dampak jangka panjang mikroplastik pada lingkungan dan kesehatan manusia,dan mengembangkan solusi pengolahan air lindi yang efektif.

1.2 Perumusan Masalah

1) Bagaimana efektivitas Penyisihan Mikroplastik dengan menggunakan Pengolahan biologis dan Fitoremediasi dalam bentuk *Constructed wetland* dalam mengurangi mikroplastik pada air lindi?
2) Berapa jumlah kelimpahan dan karakteristik mikroplastik pada air lindi sebelum dan sesudah dilakukan pengolahan biologis dan Fitoremediasi*?*

1.3 Tujuan Penelitian

1) Menganalisis efektivitas penyisihan mikroplastik menggunakan pengolahan biologis dan fitoremediasi dalam bentuk *Constructed Wetland* terhadap penurunan kandungan mikroplastik pada air lindi.
2) Mengidentifikasi jumlah kelimpahan serta karakteristik mikroplastik pada air lindi sebelum dan sesudah dilakukan pengolahan biologis dan fitoremediasi.

1.4 Manfaat Penelitian

1) Meningkatkan pemahaman tentang efektivitas Pengolahan Biologis dan Fitoremediasi menggunakan metode *Constructed wetland* dalam mengurangi mikroplastik pada air lindi.
2) Memberikan informasi tentang jenis jenis mikroplastik pada limbah air lindi.

1.5 Ruang Lingkup

Ruang lingkup pada penelitian ini adalah

1. Tanaman *Typha angustifolia L.* sebagai agen fitoremediasi dalam sistem *constructed wetland.*
2. Parameter yang diuji adalah Mikroplastik (Mps).
3. Pengambilan sampel air lindi dilakukan pada unit pengolahan air lindi TPA Piyungan.
4. Lokasi pengujian sampel dilakukan di Laboratorium Kualitas Lingkungan Teknik Lingkungan Universitas Islam Indonesia.
5. Selain sampel lindi,dilakukan pengujian tanah pada reaktor *constructed wetland* sebelum dilakukan pengaliran (*running*) air lindi.
6. Jenis mikroplastik yang diidentifikasi meliputi jenis mikroplastik dan jumlah partikel sebelum dan sesudah pengolahan.
7. Metode yang digunakan yaitu *Wet Peroxide Oxidation*(WPO),*Density Separation*,Penyaringan,Analisis *Mikroskop Trinokuler* dan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTI-R)
8. Menentukan efektivitas Pengolahan biologis dan *constructed wetland* dalam mengurangi mikroplastik pada air lindi.

.

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Air lindi

2.1.1 Definisi air lindi

Air lindi merupakan air dengan konsentrasi kandungan organik yang tinggi yang terbentuk dalam tumpukan sampah akibat adanya air hujan yang masuk ke dalam tumpukan sampah dan akibat proses dekomposisi sampah oleh mikroorganisme. Air lindi merupakan cairan yang sangat berbahaya karena selain kandungan organiknya tinggi, juga dapat mengandung unsur logam (seperti Zn, Hg). Jika tidak ditangani dengan baik, air lindi dapat masuk ke dalam tanah sekitar landfill kemudian dapat mencemari air tanah di sekitar TPA. Komposisi dan karakteristik lindi sangat bervariasi dari waktu ke waktu bergantung pada aktivitas secara fisik, kimia dan biologis yang terjadi dalam sampah. Dalam Soemirat (1996) disebutkan bahwa lindi merupakan larutan yang terbentuk akibat adanya infiltrasi dan atau perkolasi dari limpasan air hujan yang mengenai tumpukan sampah yang telah membusuk.

2.1.2 Dampak Air lindi terhadap lingkungan

Kandungan air lindi berupa zat tersuspensi yang sangat halus dan di dalamnya banyak kandungan mikrobia patogen. Bahan-bahan terlarut dari sampah tersebut terekstraksi dan berbaur. Kandungan BOD dalam air lindi dapat sangat tinggi, mencapai 3.500 mg/L, sehingga merupakan agen potensial bagi pencemaran air permukaan maupun air tanah. Cairan ini harus diolah dalam suatu unit pengolahan aerobik atau anaerobik sebelum dibuang ke lingkungan. Tingginya kadar COD dan ammonia pada air lindi (dapat mencapai ribuan mg/L), sehingga pengolahan air lindi harus dilakukan dengan baik (Machdar, 2008). Lindi timbul akibat masuknya air eksternal ke dalam timbunan sampah, melarutkan dan membilas materi-materi terlarut, termasuk materi organik hasil proses dekomposisi secara biologi.

Air tanah yang tercemar oleh air lindi dengan kadar konsentrasi yang tinggi, akan mengalami penumpukkan air lindi karena ketersediaan oksigen terlarut pada air tanah terbatas sehingga tidak terdekomposisi secara alami. Penumpukkan ini

kemudian akan mencemari seluruh kadar air bersih pada air tanah. Hal ini disebut berkaitan dengan pencemaran air sumur. Air sumur yang terkontaminasi lindi disebut air yang tidak layak untuk digunakan karena dampaknya pada fisiologi tubuh (Thomas & Santoso, 2019).

2.2 Mikroplastik

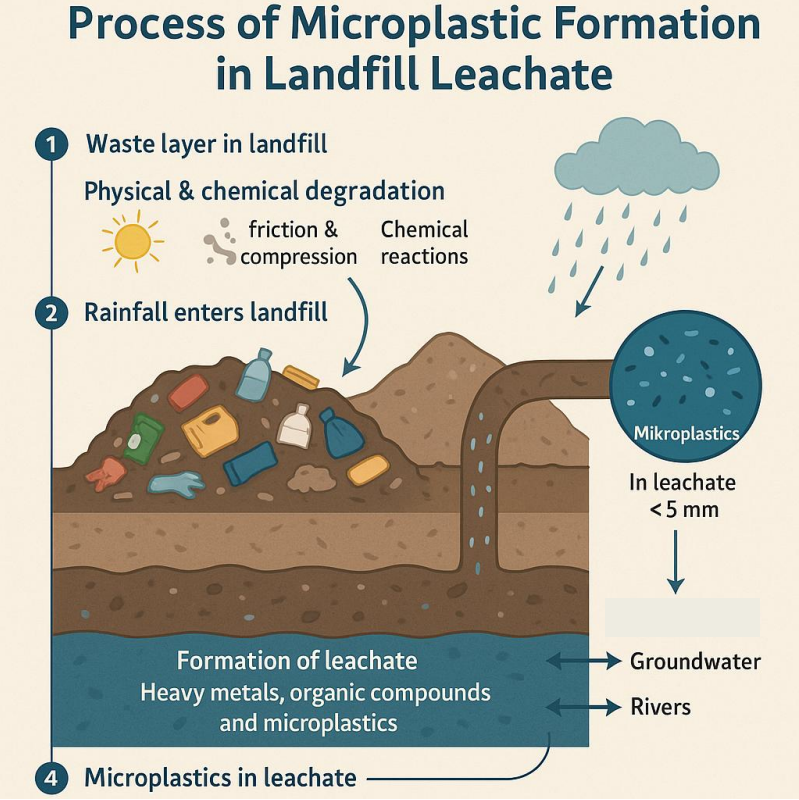
2.2.1 Definisi Mikroplastik

Mikroplastik pertama kali diidentifikasi keberadaannya pada sekitar tahun 1970 (Dehaut dkk., 2016). Mikroplastik menurut Lusher & Peter (2017) didefinisikan sebagai partikel plastik kecil berukuran 5 mm atau lebih kecil. Mikroplastik ada di lingkungan baik udara, tanah, air tawar, laut. Pada laut mikroplastik tersebar di pantai, perairan dangkal, perairan dalam. Mikroplastik menjadi perhatian khusus karena dapat mengakumulasi kontaminan organik dalam jumlah besar. Mikroplastik yang masuk ke sistem akuatik, secara tidak langsung dapat masuk ke sistem pencernaan berbagai organisme yang terakumulasi melalui jaring makanan. Meskipun ditemukan lebih dari 40 tahun yang lalu, kesadaran akan bahaya mikroplastik di perairan telah meningkat pesat dalam beberapa tahun terakhir. Beberapa penelitian telah menunjukkan bahwa mikroplastik dapat memiliki efek negatif pada organisme akuatik dan terestrial. Oleh karena itu, identifikasi dan kuantifikasi sumber utama mikroplastik harus diprioritaskan, dan tindakan harus diambil untuk mengurangi aliran mikroplastik dari sumber ini (Lusher & Peter, 2017). Mikroplastik yang terdeteksi dapat berasal dari sumber primer dan sekunder. Mikroplastik primer berasal dari sumber yang sengaja memproduksi mikroplastik seperti *scrub* kosmestik, industri yang mengolah bahan polimer dan lain-lain. Sumber primer mencakup kandungan plastik dalam produk-produk pembersih dan kecantikan, pelet untuk pakan hewan, bubuk resin, dan umpan produksi plastik. Sementara itu, mikroplastik sekunder adalah mikroplastik yang dihasilkan akibat fragmentasi plastik yang lebih besar (Veronika, 2017).

2.2.2 Sumber Mikroplastik

Sumber mikroplastik terbagi menjadi dua, mikroplastik primer dan mikroplastik sekunder. Mikroplastik primer umumnya didefinisikan sebagai

mikroplastik yang diproduksi dan dilepaskan ke lingkungan dalam ukuran mikro atau sangat kecil (Duis & Coors, 2016). Kandungan plastik yang terdapat pada produk pembersih serta kecantikan, makanan hewan (pelet), bubuk resin, dan produk plastik termasuk kedalam sumber mikroplastik primer. Sedangkan, mikroplastik sekunder ialah mikroplastik yang berasal proses fragmentasi potongan plastik yang berukuran lebih besar. Mikroplastik sekunder bisa bersumber dari serat atau potongan rantai dari plastik yang berukuran lebih besar. Potongan tersebut bisa berasal dari perabotan rumah tangga, jaring penangkap ikan, bahan baku proses industri, degradasi dari kantong plastik, dan akibat proses *washing* dan pelapukan produk (Victoria, 2017).



Gambar 2.1 Ilustrasi timbulnya mikroplastik

2.2.3 Mikroplastik dalam air lindi

Menurut He,dkk (2019) air lindi yang dihasilkan di Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) merupakan salah satu sumber yang dapat menghasilkan mikroplastik. Beberapa penelitian yang dilakukan menunjukkan bahwa sampel lindi mengandung mikroplastik. Su,dkk., (2018) menyatakan bahwa mikroplastik di TPA tergolong

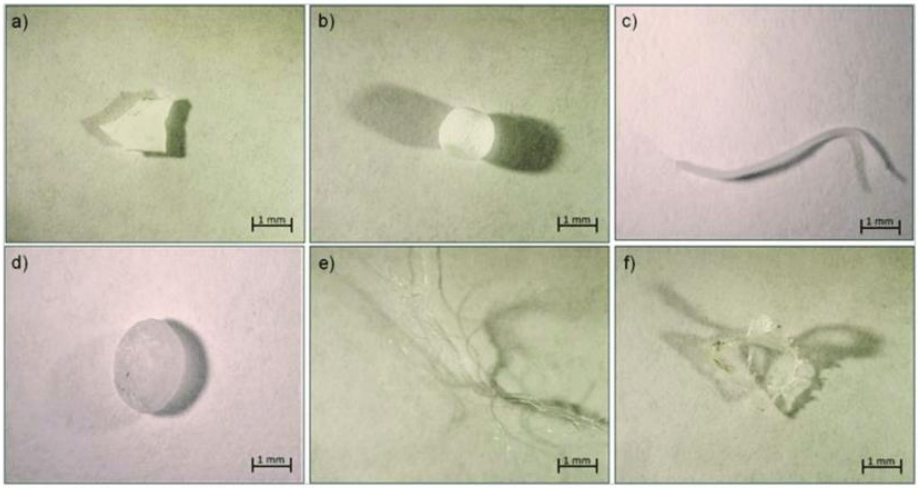
mikroplastik sekunder karena sampah yang masuk ke dalam TPA kebanyakan berasal dari limbah rumah tangga dan industri. Selain itu, usia TPA dan sampah yang terdapat di lindi TPA mempengaruhi jumlah kandungan mikroplastik. Lindi TPA yang sudah lama beroperasi memiliki kandungan dan ukuran mikroplastik lebih kecil dibanding lindi TPA yang baru beroperasi. Sedangkan untuk mikroplastik ukuran lebih besar lebih banyak ditemukan di TPA usia menengah (3-20 tahun). Pinjing He dkk., (2016) di China menyatakan bahwa dua belas sampel lindi dari empat TPA sampah kota yang masih aktif dan tertutup mengandung mikroplastik. Penelitian yang dilakukan oleh Hou,dkk (2020), di TPA terkhususnya di pengolahan lindi terjadi degradasi mikroplastik dengan melibatkan mikroorganisme seperti bakteri dan jamur serta kondisi lingkungan di TPA. Penelitian lainnya yang dilakukan oleh Puthcharoen,dkk., (2019), jenis penimbunan mempengaruhi kandungan mikroplastik di TPA. Jenis penimbunan *sanitary landfill* memiliki kandungan mikroplastik lebih kecil dibanding menggunakan jenis penimbunan *open dumping*.

2.2.4 Karakteristik mikroplastik

Mikroplastik memiliki macam bentuk yang umum diidentifikasi di perairan, yaitu fragmen, pelet, serat atau fiber, film, lembaran dan foam. Fragmen berbentuk partikel keras yang bentuknya tidak beraturan dari pecahan plastik yang lebih besar. Menurut Faujiah & Wahyuni, (2022) jenis fragmen berasal dari botol minuman, toples, galon isi ulang, bahan mika dan pipa paralon. Pada bentuk serat berasal dari aktivitas pesisir, yaitu *fragmentasi monofilamen* pakaian, tali dan peralatan tangkap nelayan jaring dan pancing. Bentuk film merupakan pecahan plastik dengan densitas rendah yang rentan terpecah. Jenis ini berasal dari fragmentasi kantong plastik sekali pakai baik penggunaan sehari-hari maupun pada kemasan makanan. Pada bentuk pelet ditemukan bersumber dari sisa bahan baku industri, bahan toiletries, sabun dan butiran halus pada sabun pembersih wajah. Pada bentuk foam berasal dari kemasan pengepakkan dan tas plastik .

Jenis polimer mikroplastik yang umum ditemukan di lingkungan dalam (Faujiah & Wahyuni, 2022) yaitu*, Polystyrene (PS), Polypropylene (PP), Polyethylene (PE), Polyethylene-terefthalat (PET), Polyvinyl Chloride (PVC), Polyamide atau nylon (PA), Acrylonitril Butadiene stryrene (ABS), Polymethyl*

methacrylate (PMMA), dan Polycarbonate (PC). Disebutkan oleh Lusher et al (2017) berdasarkan sumbernya, jenis *Polystyrene* biasa digunakan sebagai bahan pembuatan furniture atau pelapis kayu dan wadah box penyimpanan, *Polypropylene* sebagai bahan aplikasi pembuatan tali, tutup botol, roda gigi, alat pemancing, dan pengikat *Polyethylene* diaplikasikan dalam bahan baku pembuatan kantong plastik, kontainer penyimpanan,*Polyethylene-terefthalat* sebagai bahan pembuatan botol, pengikat, dan tekstil, *Polyvinyl Chloride* digunakan dalam pembuatan selaput, pipa, dan kontainer,*Polyamide* diaplikasikan dalam pembuatan tali jaring ikan.



Gambar 2.2 Karakteristik Mikroplastik

Contoh mikroplastik dengan bentuk yang berbeda: (a) fragmen, (b) foam, (c) Fiber, (d) pelet, (e) serat, (f) film (Mauro F.La Russa, 2021).

2.2.5 Dampak mikroplastik pada kesehatan dan lingkungan

Mikroplastik memiliki ukuran yang kecil, memungkinkan tertelan oleh biota laut dan berdampak buruk apabila terakumulasi di dalam tubuh manusia atau biota lainnya melalui rantai makanan (M. Eriksen et al, 2014). Menurut investigasi yang dilakukan Lusher, et al (2017), menyimpulkan bahwa pada ikan invertebrata mikroplastik ukuran kecil dari 500 µm mungkin melewati dinding usus dan menurut Deng Y., et al. (2017) dengan ukuran kecil dari 20 µm dapat terakumulasi pada organ hati, ginjal dan usus mencit. Keberadaan mikroplastik yang terakumulasi di dalam tubuh memberikan dampak buruk, seperti peradangan pada organ, cedera internal dan/atau eksternal, transformasi kandungan kimia plastik ke dalam tubuh, gangguan mikroba usus yang berdampak pada penyumbatan saluran

usus dapat menyebabkan sensasi kenyang semu, stress fisiologis, perubahan pola makan, penghambat pertumbuhan dan penurunan kesuburan (S. Wright & F. Kelly, 2017). Pada beberapa organisme laut seperti ikan, kerang, mamalia laut telah terkontaminasi secara tidak langsung pada pola rantai makanannya. Disebutkan oleh Azizah, et al (2020), berdasarkan sampel ikan dan kerang yang diteliti, ditemukan 60% berbentuk fragmen, 37% berbentuk foam, 2% dalam bentuk film, dan 1% dalam bentuk monofilamen.

Paparan mikroplastik pada manusia dapat terjadi melalui berbagai jalur, termasuk konsumsi makanan dan minuman, inhalasi udara, maupun kontak kulit. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa mikroplastik telah terdeteksi pada air minum kemasan, garam laut, ikan, bahkan pada jaringan manusia seperti plasenta dan paru-paru (Leslie et al., 2022; Ragusa et al., 2021). Dampaknya terhadap kesehatan manusia semakin mendapat perhatian karena potensi mikroplastik dalam memicu respon inflamasi, stres oksidatif, gangguan fungsi reproduksi, dan bahkan risiko penyakit kardiovaskular serta neurodegeneratif (Wang et al., 2021; Prata et al., 2020). Selain itu, mikroplastik juga dapat membawa bahan kimia berbahaya seperti bisphenol A (BPA) dan logam berat yang bersifat toksik serta berperan sebagai endocrine disrupting chemicals (EDCs).

2.3 Proses pengolahan limbah

2.3.1 Pengolahan Biologis

Salah satu pendekatan ramah lingkungan untuk mengurangi mikroplastik adalah pengolahan biologis, yaitu dengan memanfaatkan mikroorganisme yang mampu memecah polimer plastik menjadi senyawa yang lebih sederhana. Proses ini berlangsung melalui beberapa tahapan, yakni kolonisasi mikroba pada permukaan plastik, pembentukan biofilm, *sekresi enzim* oksidase dan *hidrolase,* serta fragmentasi polimer menjadi oligomer dan monomer yang akhirnya mengalami mineralisasi menjadi CO_2, H_2O, dan biomassa sel (Gewert, Plassmann, & MacLeod, 2015; Raddadi & Fava, 2019). Berbagai jenis mikroorganisme telah diidentifikasi memiliki kemampuan mendegradasi plastik, misalnya *Pseudomonas stutzeri* yang efektif mendegradasi LDPE dan PE (Setyorini, Lestari, & Nugraha, 2021), serta *Bacillus circulans* dan *Pandoraea spp*. yang terbukti mampu

mendegradasi PS dan PET dengan penurunan massa signifikan (Isnugroho, Prasetyo, & Fadhilah, 2023). Selain bakteri, fungi seperti *Aspergillus* dan *Penicillium* juga menghasilkan *enzim hidrolase* yang dapat memutus ikatan ester pada polimer PET (Wei & Zimmermann, 2017). Mekanisme ini selaras dengan konsep bioremediasi, yakni pemanfaatan organisme hidup untuk menguraikan atau mentransformasi polutan berbahaya menjadi senyawa yang lebih aman dan ramah lingkungan (Vidali, 2001). Dengan demikian, pengolahan biologis tidak hanya efektif dalam menurunkan kelimpahan mikroplastik, tetapi juga merupakan bagian integral dari strategi bioremediasi modern untuk mitigasi pencemaran plastik secara berkelanjutan.

2.3.1 Fitoremediasi

Fitoremediasi didefinisikan sebagai pencucian polutan menggunakan tumbuhan, baik berupa pohon, rumput-rumputan maupun tanaman air. Pencucian bisa berarti penghancuran, inaktivasi, atau imobilisasi polutan ke bentuk yang tidak berbahaya (Chaney,dkk., 1995) dalam Hidayati, 2005). Metode fitoremediasi adalah salah satu cara yang digunakan untuk pengolahan lindi yang memanfaatkan simbiosis mikroorganisme dalam tanah dan akar tanaman (Usman dan Santosa, 2014). Sistem kerjanya sebagai biofilter yang dapat mengurangi karbon organik, nitrogen, fosfor, logam berat, dan senyawa organik beracun dalam media air. Beberapa tanaman air terbukti mampu mengolah lindi, antara lain: *Phragmiter mauritianus, Typha latifolia, Nymphaea spontanea, Cyperus papyrus, Typha angustifolia, Limnocharis flava, Eichornia crasipes, Pistia stratiotes, Cyperus haspan, Scripus sumatrensis, Scirpus mucronatus, Phragmites australis, dan Glyceria maxima* (Fajariyah dan Mangkoedihardjo, 2017).

2.3.2 *Constructed wetland*

Constructed wetland merupakan pengolahan limbah cair dengan menggunakan saluran dangkal ataupun kolam yang ditanami dengan tumbuhan air. Perlakuan ini mengandalkan proses fisika, kimia, dan biologi untuk mengolah air limbah. Keterlibatan tanaman di dalam penggunaannya menunjukkan bahwa *constructed wetland* umumnya dilakukan dengan menggandeng metode fitoremediasi, yang mana berfokus pada proses penggunaan tanaman untuk menghilangkan dan memperbaiki kondisi tanah, sludge, kolam hingga air dari

kontaminan (Stefanakis et al., 2015). Metode ini dikenal memiliki sederet keunggulan seperti relatif murah dibandingkan dengan metode konvensional lainnya, kemudian efisiensi relatif tinggi, toleran terhadap konsentrasi pencemar yang besar, serta zat pencemar dapat dimanfaatkan kembali menjadi biomassa yang bernilai ekonomi (Cahyana & Aulia, 2019).

Salah satu jenis wetland adalah *Floating Treatment Wetland* (FTW).Jenis *wetland* ini menggunakan tanaman ditanam dan tumbuh pada suatu media yang mengapung. Dengan cara ini maka akar dari tanaman akan dapat berkembang dan menggantung bebas didalam air, dan daun muncul di permukaan (Pusparinda dan Irwan, 2016).

Proses pengolahan kandungan berbahaya pada air lindi dengan proses fitoremediasi ini dilakukan dengan memanfaatkan tumbuhan, baik dalam bentuk pohon, tanaman air, maupun rerumputan. Proses Fitoremediasi ini dilakukan dengan memanfaatkan simbiosis pada mikroorganisme di tanah dan akar tanaman (Usman dan Santosa, 2014).

2.3.3 Tanaman *Typha angustifolia*

Tanaman *Typha angustifolia* memiliki daya tahan yang cukup kuat, tidak mudah mati, serta memiliki akar serabut yang sangat kuat dan lebat sehingga mampu menyerap unsur hara dari bahan pencemar dalam jumlah relative besar (Hidayah & Aditya, 2017). Tanaman ini mudah untuk dijumpai di lahan basah alami di Indonesia, sehingga tidak sulit untuk menemukannya. Pemilihan *Typha angustifolia* sebagai agen penyerap polutan organik dalam penelitian ini sesuai dengan kriteria tanaman fitoteknologi yang berlaku. Kriteria-kriteria ini meliputi sifat yang kuat, mudah diperbanyak, mampu menghasilkan biomassa dalam jumlah besar, toleran terhadap efek dari kontaminan maupun logam, mudah untuk dibudidayakan, memiliki daya serap yang baik, serta bukan bagian dari tanaman konsumsi (Kafle et al, 2022) (Leto et al, 2013) (Dzakwan & Ni'am, 2018).

Typa angustifolia mempunyai tinggi sekitar yang dapat mencapai 1,5 m dengan batang yang bulat dengan akar berbentuk rimpang. Tanaman ini mampu digunakan sebagai bahan anyaman dengan daun yang dapat dibuat tikar (Ramadhani et al., 2019).*Typha angustifolia* L. atau cattail berdaun sempit merupakan tanaman air dari famili *Typhaceae* yang banyak ditemukan di ekosistem

rawa, danau, tepi sungai, serta lahan basah dangkal dengan kedalaman air sekitar 10–50 cm. Tanaman ini memiliki morfologi khas berupa batang tegak silindris dengan tinggi 1,5–3 meter, daun berbentuk pita sempit berukuran 0,5–1,5 cm, serta bunga berbentuk tongkat silindris berwarna cokelat gelap. Sistem akar *Typha angustifolia* berupa *rhizome* menjalar dengan perakaran serabut yang kuat, mampu menyalurkan oksigen ke zona *rhizosfer* sehingga mendukung aktivitas mikroba dalam proses degradasi polutan. Secara *ekofisiologis,* tanaman ini toleran terhadap kondisi perairan tercemar, termasuk limbah domestik maupun industri, serta mampu menyerap nutrien (nitrogen dan fosfor), logam berat, polutan organik, bahkan mikroplastik. Oleh karena itu, *Typha angustifolia* banyak dimanfaatkan dalam sistem *constructed wetland* sebagai agen fitoremediasi yang efektif untuk menurunkan BOD, COD, nutrien, logam berat, sekaligus meningkatkan aktivitas biologis melalui interaksi dengan mikroorganisme di sekitar akar.



Gambar 2. 1 Tanaman Typha Angustifolia

Sumber : https://plants.ces.ncsu.edu/plants/typha-angustifolia/

2.4 Penelitian Terdahulu

Berikut merupakan tabel penelitian terdahulu yang bisa digunakan sebagai referensi dan acuan dalam penelitian :

Peneliti (Tahun)	Judul Penelitian	Metode	Hasil Utama
Ratih dkk., (2021)	Fitoremediasi Air Lindi menggunakan Eceng Gondok (*Eichhornia crassipes*) dan Kayu Apu (*Pistia stratiotes*)	Membandingkan efektivitas eceng gondok dan kayu apu dalam mengolah air lindi	Kedua tanaman efektif menurunkan BOD, COD, dan TSS. Eceng gondok lebih efektif dalam menyerap logam berat
Purwanti dkk., (2022)	Studi Komparatif Fitoremediasi Air Lindi menggunakan Tanaman Akuatik Lokal	Membandingkan efektivitas tiga jenis tanaman akuatik lokal dalam mengolah air lindi	Semua tanaman menunjukkan kemampuan dalam menurunkan polutan organik. Perbedaan signifikan dalam penyerapan logam berat
Nugroho dkk., (2023)	Potensi Fitoremediasi untuk Pengolahan Mikroplastik dalam Air Limbah	Menguji kemampuan beberapa jenis tanaman air dalam menyaring mikroplastik dari air limbah sintetis	Beberapa tanaman menunjukkan potensi dalam menahan mikroplastik, namun efektivitasnya bervariasi tergantung ukuran partikel
Alma,(2023)	Analisis Kelimpahan Mikroplastik Pada Air Lindi di Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) Gampong Jawa Banda Aceh	Analisis mikroplastik dilakukan menggunakan metode gravimetri yang diadopsi dari metode Ihsan (2021) dan Utami & Agustina (2022). Kelimpahan mikroplastik dihitung dalam satuan partikel/L berdasarkan jumlah, warna, bentuk dan jenis polimer mikroplastik	Bentuk mikroplastik yang didapatkan yaitu fiber, fragmen, pellet dan benang. Sedangkan warna yang teridentifikasi yaitu merah, putih, biru, hijau, hitam dan kuning.

Peneliti (Tahun)	Judul Penelitian	Metode	Hasil Utama
Xuan Zhang et al., (2025)	Karakteristik Distribusi dan Sumber Mikroplastik di Tanah Ekosistem Lahan Basah Pedalaman	Lahan basah buatan dalam studi ini tidak menghilangkan MP secara signifikan. Lahan basah danau merupakan salah satu penyerap utama MP di ekosistem lahan basah pedalaman dan telah mengakumulasi MP dalam jumlah besar.	Hasil penelitian menunjukkan bahwa kelimpahan MP di tanah lahan basah berkisar antara 532 hingga 4309 butir/kg. Transparan, serat, dan polietilen tereftalat masing-masing merupakan MP dengan warna, bentuk, dan jenis polimer yang paling umum.
Meenakshi Verma et al., (2024)	Menjelajahi kelimpahan mikroplastik dalam lindi TPA di India: Sebuah studi analitis	Penelitian terkini menyelidiki kelimpahan dan keragaman MP di dua tempat pembuangan akhir (TPA) di India, Uruli Devachi di Pune (S1) dan Deonar di Mumbai (S2). MP yang dikumpulkan dari lindi TPA menggunakan beberapa filter dianalisis menggunakan mikroskop optik dan dikategorikan berdasarkan bentuk, warna, dan ukuran untuk memberikan informasi tentang distribusinya.	Kelimpahan MP di S1 adalah 1473 ± 273,01 butir/L, sementara 2067 ± 593,75 butir/L ditemukan dalam lindi dari S2. Film dan fragmen merupakan bentuk dominan, dan hitam merupakan warna dominan MP yang ditemukan di kedua TPA. Jumlah maksimum MP berada pada rentang ukuran di bawah 100 μm di kedua TPA, sehingga diperlukan studi partikel berukuran kecil.
Sandeep Singh et al .,(2023)	Mikroplastik dalam lindi TPA, Kejadian masalah kesehatan, dan strategi pembuangan	Makalah ini memberikan tinjauan komprehensif mengenai proses degradasi makroplastik menjadi mikroplastik, jenis MP yang terdapat dalam lindi TPA *(Landfill Leachate/LL),*dan potensi toksisitas polusi mikroplastik..	Pengolahan primer seperti presipitasi kimia dan elektrokoagulasi dapat menghilangkan hingga 60–99% total MP dari air limbah, sementara pengolahan tersier seperti filtrasi pasir, ultrafiltrasi, dan osmosis terbalik dapat menghilangkan hingga 90–99%.Teknik canggih.

BAB III
METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan lokasi

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Maret 2025 sampai Mei 2025. Sampel yang akan diambil adalah sampel air lindi yang berlokasi di TPA Piyungan. TPA ini terletak pada Ngablak,Sitimulyo Kec Piyungan Kabupaten Bantul. TPA Piyungan sebagai tempat pengambilan sampel air lindi. Air lindi yang digunakan diambil dari bagian inlet IPAL lindi TPA Piyungan. Pengambilan sampel dilakukan dengan metode SNI 6989.59:2008 tentang Metode Pengambilan Contoh Air Limbah. Pewadahan menggunakan jerigen plastik,akan tetapi pengambilan sampel pada reaktor menggunakan wadah botol kaca.Pengambilan sampel air lindi dilakukan berdasarkan beberapa pertimbangan (*purposive sampling*), yaitu akses pengambilan sampel yang memungkinkan sehingga tidak berbahaya dari segi keamanan dan keselamatan. Pelaksanaan pengujian sampel yang dihasilkan dari *wetland* dilaksanakan di *workshop* Teknik lingkungan FTSP UII,dan pelaksanaan analisis pengujian mikroplastik dilaksanakan di Laboratorium Kualitas Air FTSP UII.

3.2 Alat dan Bahan

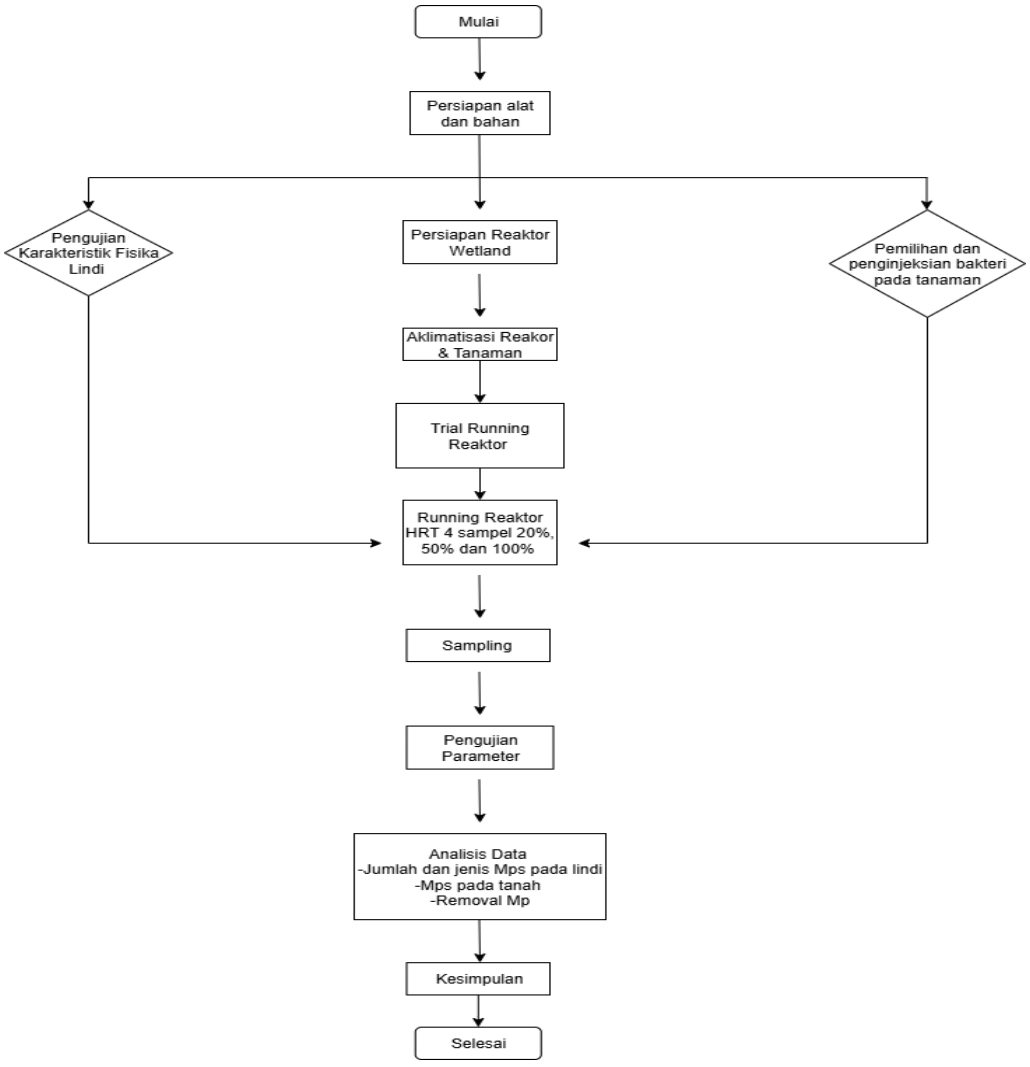
Penelitian ini menggunakan alat berupa *container box* plastik dengan dua ukuran berbeda. *Container* pertama memiliki dimensi 35 cm × 52 cm × 28 cm dengan volume 40 L, sedangkan yang kedua berukuran 56,5 cm × 40,2 cm × 34 cm dengan volume 55 L,sambungan setiap kontainer menggunakan pipa ukuran ½ beserta sambungan seperti drat sock dan kran. Selain itu, alat yang digunakan meliputi Jirigen, botol sampel kaca 100ml,Erlenmeyer,*mesh stainless* 212um dan 25um ,Kertas saring 1,6 um dan 11um ,*Vakum filtrasi*, Mikroskop 10X,40X & FTIR. Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sampel air limbah (air lindi), larutan H_2O_2 30%,FeSO4 Konsentrasi 0,05,NaCl Teknis,dan Aquades.

Metode pengolahan limbah yang diterapkan adalah fitoremediasi menggunakan tanaman *Typha angustifolia* dalam sistem *wetland*. Metode ini memanfaatkan kemampuan tanaman tersebut dalam menyerap dan mengakumulasi

kontaminan dari air limbah secara bertahap, sehingga membantu proses pemurnian air tercemar.

3.3 Alur Penelitian

Pada metode penelitian diagram alir metode penelitian dapat digunakan untuk mendapatkan gambaran tentang langkah-langkah kegiatan yang akan dilakukan selama proses penelitian. Adapun diagram alir dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

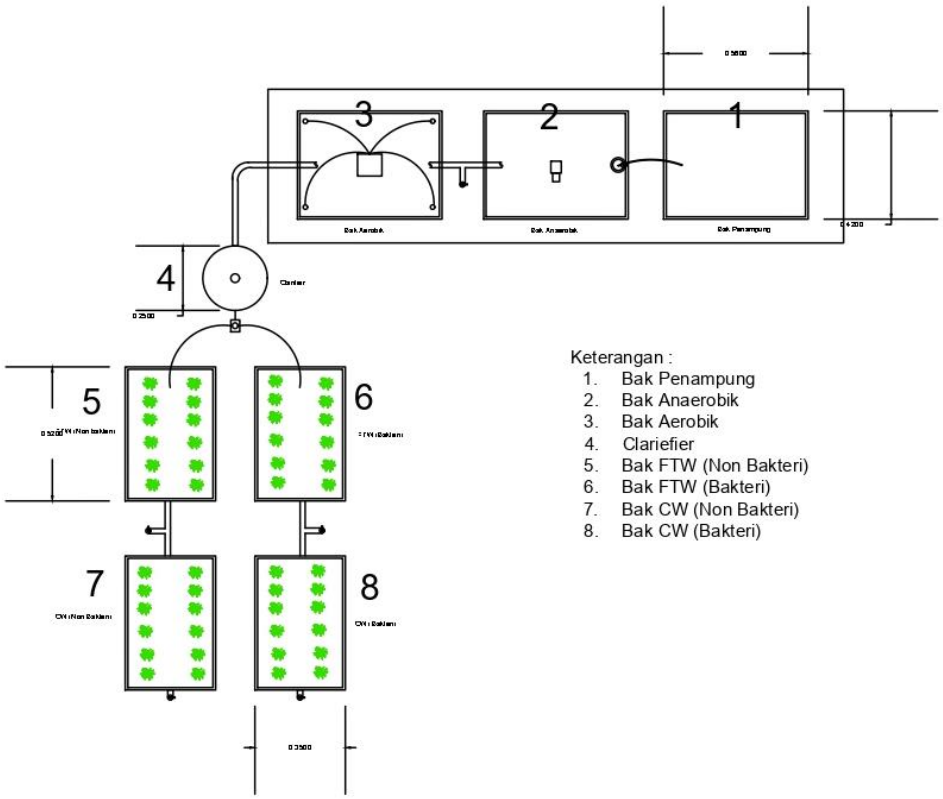


Gambar 3. 1 Alur penelitian

3.3.1 Persiapan Pembuatan Reaktor

Perancangan reaktor sebagai wadah utama untuak menjalankan proses fitoremediasi dan perlakuan mikroba secara simultan. Ukuran serta desain reaktor

disesuaikan dengan jenis tanaman yang digunakan serta volume air limbah yang akan diolah guna memastikan efisiensi proses remediasi. Struktur reaktor menggunakan *container box* plastik yang dirancang secara berurutan, terdiri dari beberapa kompartemen, yaitu bak anaerob, bak aerob, bak clariefier, bak *floating wetland*, dan bak *constructed wetland*. Setiap kompartemen memiliki peran spesifik dalam mengoptimalkan proses pengolahan air limbah.



Gambar 3. 3 Desain rangkaian reaktor



Gambar 3. 2 Gambar rangkaian reaktor

1. Bak Penampung

   Bak Penampung berperan sebagai unit pertama dalam sistem pengolahan air limbah yang berfungsi mengatur fluktuasi aliran dan kadar zat pencemar. Tujuan utamanya adalah menstabilkan debit air limbah serta beban organik, sehingga proses pengolahan berikutnya dapat berlangsung lebih optimal, sekaligus memungkinkan partikel-partikel berukuran besar mengendap secara gravitasi pada tahap awal.Bak ini berukuran 56cm x 34 cm dengan volume 55 L.

2. Bak Anaerob

   Bak Anaerob adalah reaktor tertutup yang beroperasi tanpa oksigen, di mana mikroorganisme anaerob menguraikan senyawa organik kompleks menjadi metana dan karbon dioksida. Reaktor yang dirancang penulis menggunakan sistem pengadukan, seperti *Completely Stirred Tank Reactor* (CSTR), untuk menjaga suhu, homogenitas, dan meningkatkan efisiensi kontak mikroorganisme dengan substrat, sekaligus mencegah endapan padat di dasar reaktor. Bak ini berukuran 56cm x 34 cm dengan volume 55 L.

3. Bak Aerobik

   Bak aerobik adalah reaktor biologis yang menggunakan oksigen terlarut untuk mendukung tumbuhnya mikroorganisme,alat yang digunakan yaitu alat aerasi yang menghasilkan oksigen pada reaktor. Bak ini berukuran 56cm x 34 cm dengan volume 55 L.

4. Clarifier

   Bak Clarifier atau klarifikasi sekunder berfungsi memisahkan lumpur aktif dari air hasil proses biologis. Sebagian lumpur yang mengendap akan dialirkan kembali ke sistem sebelumnya sebagai lumpur *resirkulasi*, sementara sisanya dibuang untuk proses lanjutan. Unit ini berperan penting dalam menjaga kinerja dan efisiensi proses pengolahan air limbah sebelumnya.

5. Bak *Floating Wetland*

   Bak *Floating Wetland* adalah metode pengolahan air limbah yang memanfaatkan tanaman air yang ditanam di atas pelampung, dengan akar

menggantung langsung di dalam air. Akar tanaman berfungsi sebagai media tumbuh mikroorganisme untuk proses biologis, sekaligus menyerap nutrien dan polutan seperti mikroplastik dan logam berat dari air limbah.

6. Bak *Constructed wetland*

   Bak *Constructed Wetland* merupakan lahan basah buatan yang menggunakan media seperti kerikil dan tanaman air untuk mengolah air limbah melalui proses fisik, kimia, dan biologis. Sistem ini terdiri dari beberapa tipe aliran, seperti horizontal dan vertikal, dan efektif mengurangi kandungan bahan organik, padatan tersuspensi, serta nutrien dalam limbah cair.

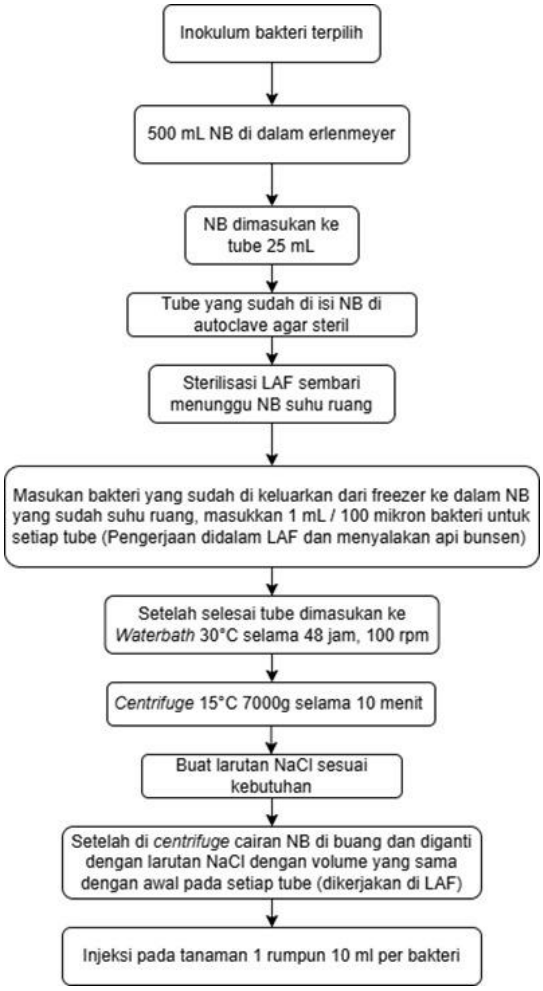
3.3.2 Pemilihan Tanaman

Tanaman air dengan kemampuan fitoremediasi yang tinggi dipilih untuk membantu menghilangkan logam berat dari air limbah. Salah satu tanaman yang digunakan adalah *Typha angustifolia*, atau lebih dikenal sebagai tanaman lembang. Tanaman ini merupakan spesies rawa dengan sistem perakaran serabut yang kuat, memungkinkan pertumbuhannya tetap stabil dalam lingkungan berair. Keunggulan utama tanaman ini terletak pada daya adaptasinya yang tinggi, sehingga mampu bertahan dalam berbagai kondisi lingkungan tanpa mengalami kematian yang signifikan. Dengan karakteristik tersebut, tanaman ini menjadi pilihan yang efektif sebagai agen remediasi dalam sistem reaktor,tanaman yang digunakan yaitu 24 batang tanaman yang dibagi 2 dalam 2 reaktor. Tanaman ini diambil di Cilacap,Jawa Tengah.

3.3.3 Kulturisasi Bakteri

Bakteri yang digunakan dalam penelitian ini merupakan isolat yang telah teridentifikasi pada studi sebelumnya yaitu bakteri (Fajri et al., 2024). Konsorsium bakteri yang terdiri atas *Bacillus cereus, Bacillus velezensis, Staphylococcus xylosus, dan Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR)* (Fajri & Wulandari., 2024).Yang berhasil tumbuh dan membentuk koloni tunggal pada penelitian terdahulu kemudian dikultur dalam 500 mL *Nutrient Broth* (NB) di erlenmeyer. Kultur tersebut diinkubasi menggunakan *waterbath shaker* selama 48 jam pada suhu 30 °C dengan kecepatan pengadukan 100 rpm. Selanjutnya, 20 mL kultur

diambil untuk pengukuran kerapatan sel melalui nilai *Optical Density* (OD) menggunakan spektrofotometer pada panjang gelombang 600 nm. Setelah itu, suspensi bakteri di *sentrifugasi* untuk memisahkan endapan sel dari media, lalu *Nutrient Broth* dibuang dan diganti dengan larutan NaCl tanpa mengganggu endapan bakteri. Seluruh proses ini dilakukan di area kerja steril, yaitu pada *Laminar Air Flow* (LAF) yang telah disterilkan.



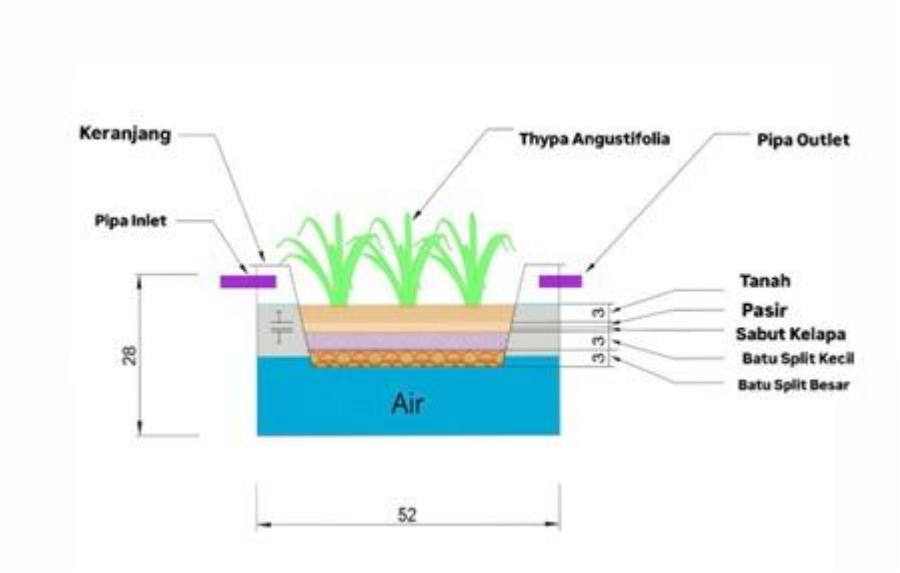
Gambar 3. 4 Alur Kulturisasi bakteri

3.3.3 Aklimatisasi

a. Reaktor *Floating Treatment Wetland* (FTW)

Pada sistem pengolahan FTW, digunakan tanaman *Typha angustifolia* (lembang) sebagai media fitoremediasi. FTW dirancang menggunakan *box kontainer* plastik berkapasitas 40 liter dan keranjang plastik sebagai wadah tanaman. Setiap unit reaktor ditanami sebanyak 9 rumpun tanaman *Typha angustifolia* dengan masing masing rumpun terdiri dari 3 batang tanaman. Media tanam dalam

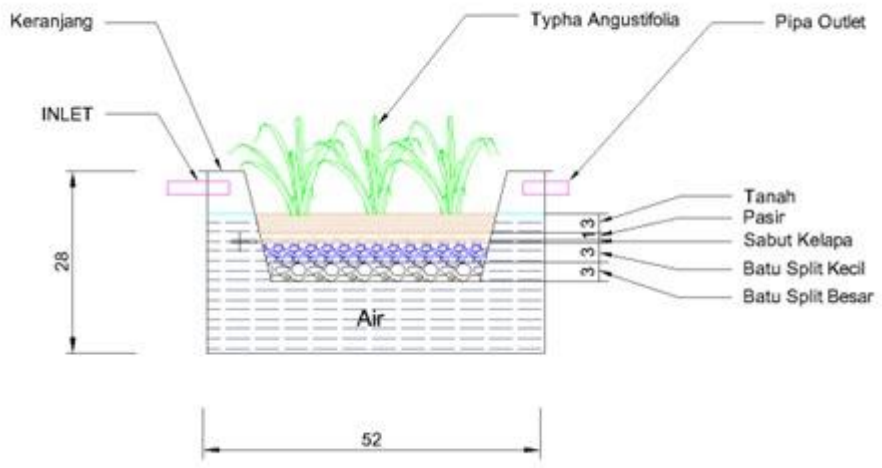
pot disusun secara berlapis, dimulai dari split besar (3 cm), split kecil (3 cm), sabut kelapa sebagai penutup, pasir (1 cm), lalu tanah (3 cm). Selanjutnya, air bersih ditambahkan ke dalam reaktor hingga merendam bagian akar tanaman.Setiap rumpun diberikan 10mL kultur bakteri yang terdiri dari *Bacillus cereus, Bacillus velezensis, Staphylococcus xylosus,* dan *Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR).*



Gambar 3. 5 Desain Reaktor *Floating Treatment Wetland*

b. Reaktor *Constructed Wetland* (CW).

Pada sistem *Constructed Wetland* (CW), digunakan jenis tanaman dan *box kontainer* yang sama seperti sistem sebelumnya. Setiap reaktor berisi 9 rumpun tanaman *Typha angustifolia* dengan masing masing rumpun tanaman, dengan masing-masing rumpun terdiri dari 2–3 batang *Typha angustifolia*. Media di dasar reaktor disusun berlapis mulai dari split besar (7 cm), split kecil (7 cm), sabut kelapa sebagai penutup, pasir (2 cm), hingga tanah (4 cm). Tanaman disiram air bersih secara rutin setiap hari. Setiap rumpun diberikan 10mL kultur bakteri yang terdiri dari 3 strain *Bacillus cereus, Bacillus velezensis, Staphylococcus xylosus,* dan *Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR).*



Gambar 3. 6 Desain Reaktor *Constructed Wetland*

c. Tanaman *Typha Angustifolia*

Setelah reaktor dirakit, tahap selanjutnya adalah melakukan aklimatisasi tanaman. Tahap ini bertujuan agar tanaman dapat beradaptasi dengan media serta kondisi lingkungan yang baru. Proses aklimatisasi berlangsung sekitar tiga setengah bulan sejak penanaman. Pada awalnya, daun tanaman dipangkas hingga menyisakan sekitar 15 cm,dalam satu reaktor terdapat 9 rumpun tanaman dengan masing masing rumpun terdiri dari 3 batang,diberikan pada seluruh tanaman dengan penambahan bakteri sebelum proses *trial reaktor* dilakukan dengan cara menginjeksi 10ml bakteri pada 1 rumpun tanaman. Selama dua bulan pertama, pemupukan dilakukan seminggu sekali menggunakan pupuk hidroponik. Aklimatisasi dimulai pada 29 September 2024 dan berakhir pada 3 Januari 2025. Proses ini dianggap tuntas ketika batang dan daun tanaman telah kembali menghijau serta akar tumbuh lebat, yang menunjukkan tanaman telah berhasil menyesuaikan diri dengan lingkungannya.



Gambar 3. 7 Aklimitasi tanaman

d. *Sludge* Anaerobik

Proses aklimatisasi lumpur merupakan tahap adaptasi mikroorganisme terhadap substrat maupun kondisi lingkungan baru dalam sistem pengolahan limbah, baik pada reaktor anaerob maupun aerob menggunakan air lindi konsentrasi 20%. Pada penelitian ini, lumpur diperoleh dari Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) dari kawasan industri di Kabupaten Batang, Jawa Tengah sebanyak 10 liter. Tujuan utama aklimatisasi adalah memastikan mikroba mampu tumbuh dan berfungsi secara optimal sesuai kondisi operasional, sehingga proses degradasi bahan organik dapat berlangsung lebih stabil dan efisien.Selama periode ini, parameter lingkungan seperti parameter kualitas air seperti pH, SV30, *Oxidation Reduction Potential* (ORP), *Electro Conductivity* (EC), *Total Dissolved Solid* (TDS) dipantau untuk kesesuaian kondisi bagi pertumbuhan mikroba pada reaktor biologis,Proses aklimatisasi ini selesai dengan indikator terjadi penambahan sludge dan nilai SV30 mencapai 90 hingga 150mL/L.

Pemberian substrat dilakukan secara bertahap melalui penambahan gula dan urea pada reaktor bak penampung sebagai sumber nutrisi pendukung aktivitas mikroorganisme. Proses penambahan dilakukan mulai Desember 2024 dengan konsentrasi lindi 20% hingga Juli 2025, melalui tahapan dari rasio rendah (10:1/gram) hingga rasio tinggi (40:4/gram). Substrat dicampurkan ke dalam 500 mL air lindi yang dilarutkan dalam bak penampung berkapasitas 48 Liter. Tahapan

bertingkat ini dimaksudkan untuk mengurangi stress pada mikroba sekaligus membiasakan mereka dengan karakteristik limbah yang sesungguhnya akan diolah.

3.3.4 *Trial* Reaktor

Percobaan awal dilakukan dengan mengoperasikan reaktor menggunakan campuran air lindi sebanyak 20% dari total volume reaktor. Konsentrasi ini dipilih untuk menguji kinerja sistem dalam menangani limbah dengan beban polutan ringan, sekaligus memberikan waktu adaptasi bagi mikroorganisme dan tanaman terhadap karakteristik air lindi. Selama periode uji coba, parameter kualitas air seperti pH, SV30, *Oxidation Reduction Potential* (ORP), *Electro Conductivity* (EC), *Total Dissolved Solid* (TDS), dan suhu dipantau setiap hari guna untuk memastikan kinerja sistem serta efektivitas proses biodegradasi. Hasil percobaan ini menjadi acuan dalam menentukan kesiapan reaktor sebelum berlanjut ke tahap pengolahan dengan konsentrasi air lindi yang lebih tinggi dan agar bisa dilakukan ke tahap selanjutnya.

3.3.5 Proses Runing Reaktor

Setelah uji coba, air limbah lindi dialirkan secara kontinu ke dalam reaktor dengan konsentrasi 20% 50% dan 100% untuk menganalisis pengaruh beban terhadap pengolahan biologis dan *wetland*. Selama proses berlangsung, parameter seperti pH dan sludge rutin dipantau untuk menjaga kondisi optimal bagi aktivitas mikroorganisme dan pertumbuhan tanaman. Penelitian ini menerapkan variasi *Hydraulic Retention Time* (HRT) pada reaktor aerobik dan anerobika adalah selama 4 hari dengan debit 30mL/menit melalui pengaturan pompa dari bak penampung menggunakan pompa prestaltik.HRT 4 hari memungkinkan waktu kontak lebih lama, meningkatkan efisiensi penghilangan mikroplastik dan penurunan parameter pencemar menurut penelitian sebelumnya.

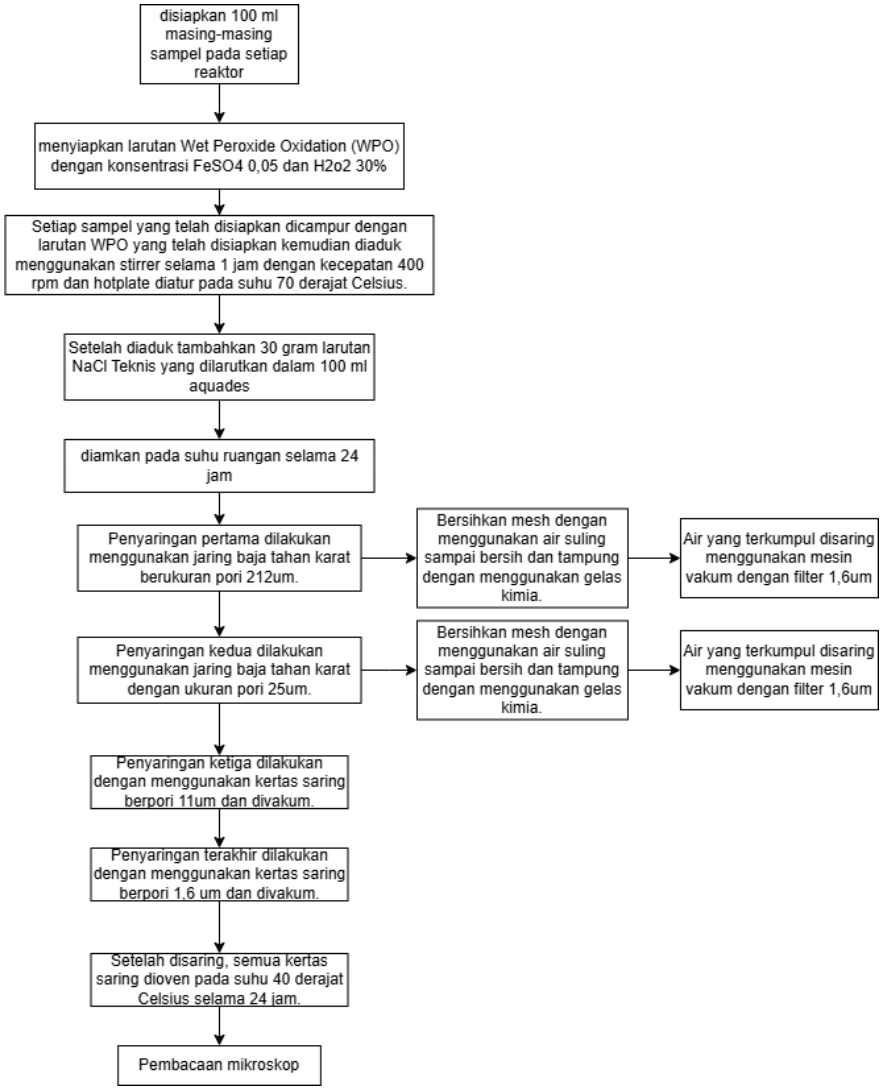
3.3.6 *Sampling* & Pengujian Sampel

Pelaksanaan pengambilan sampel dilakukan keseluruhan 7 reaktor wetland yaitu pada bak penampung,anerobik,clarifier,*constructed wetland* bakteri dan non bakteri dan *floating wetland* bakteri dan non bakteri sebanyak lebih kurang 500ml menggunakan botol sampel kaca untuk diuji ke laboratorium, waktu pengambilan sampel pada setiap persen variasi aliran lindi yaitu di hari ke 28 running reaktor

pervariasi lindi, pengambilan dilakukan dengan mengambil sampel di keran masing masing setelah itu dilakukan dengan pengujian mikroplastik.Untuk sampel tanah diambil pada proses aklimitiasi sebanyak 35gr di reaktor *constructed wetland* bakteri & non bakteri,setelah itu dilakukan pengambilan sampel tanah setelah selesai konsentrasi 100% di reaktor yang sama.Selain itu juga diuji parameter fisika seperti pH,suhu,TSS diukur setiap harinya dari awal 20% hingga 100% dikarenakan pH mempengaruhi aktivitas mikroorganisme yang berperan dalam proses biodegradasi atau penguraian bahan organik. Perubahan pH yang ekstrem (terlalu asam atau basa) bisa menurunkan kemampuan tanaman dan bakteri dalam CW untuk menyerap atau menjebak mikroplastik sedangkan pada suhu dapat memengaruhi metabolisme mikroba di dalam CW, sehingga berpengaruh pada efisiensi degradasi dan penyerapan polutan.

Suhu yang terlalu tinggi atau rendah dapat mengurangi kemampuan tanaman maupun biofilm mikroba dalam menjebak mikroplastik. TSS menunjukkan jumlah padatan tersuspensi dalam air, yang seringkali berasosiasi dengan mikroplastik. Semakin tinggi TSS, potensi keberadaan mikroplastik juga cenderung meningkat.

Sampel dilakukan pengujian mikroplastik sebagai berikut :



Gambar 3. 9 Alur pengujian sampel lindi

a. *Wet Peroxide Oxidation* (WPO)

Tahap ini bertujuan untuk menghancurkan bahan organik dan meningkatkan densitas larutan yang mengandung mikroplastik. Pada tahap ini dilakukan dengan cara menambahkan 20 mL larutan 0.05 M Fe(II) pada sampel air lindi. Kemudian ditambahkan 20 mL 30% hidrogen peroksida (H2O2). Setelah diaduk hingga homogen, sampel ditutup menggunakan alumunium foil dan dipanaskan pada suhu 60°C-70°C diatas hot plate.

Apabila suhu sampel telah mencapai 45°C, kemudian sampel didiamkan hingga suhu ruang (Sutanhaji,dkk. 2023).

b. *Density Separation*

Tahap ini bertujuan untuk memisahkan antara endapan organik dan partikel mikroplastik agar memudahkan identifikasi dan analisis selanjutnya. Tahap ini dilakukan ketika sampel telah suhu ruang, 20°C-25°C. Kemudian ditambahkan bubuk NaCl 30 gram /100mL volume sampel dan diaduk hingga larut. Lalu sampel ditutup dengan alumunium foil dan didiamkan selama 24 - 48 jam.

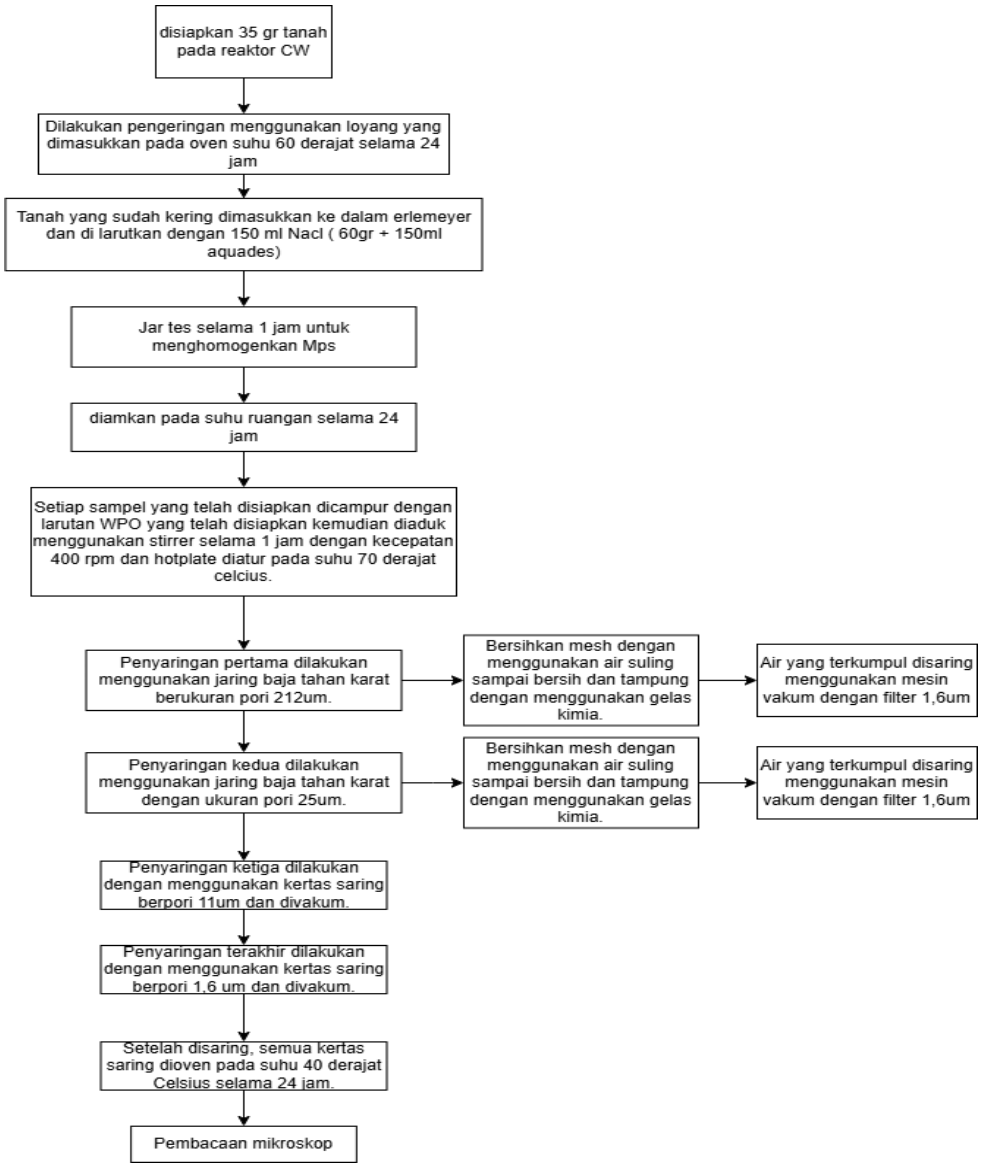
c. Penyaringan

Tahap penyaringan menggunakan *mesh stainless* 212 um dan 25um serta kertas saring berukuran 11um dan 1,6um. Tahap ini bertujuan untuk menahan partikel mikroplastik, memudahkan dalam menentukan kelimpahan mikroplastik dalam sampel dan menentukan ukuran mikroplastik yang tertahan.Penyaringan dilakukan dengan menuangkan sampel ke kertas saring menggunakan *vacuum filter*. Kemudian sampel kertas whatman di simpan di cawan petri pada suhu ruang untuk selanjutnya dilakukan analisis mikroskop (Putri S. 2023).

d. Pembacaan mikroskop

Tahap analisis ini untuk mengidentifikasi mikroplastik yang prinsipnya melakukan pengamatan mikroskopis pada sampel whatman yang telah dibagi menjadi empat kuadran. Pengamatan ini bertujuan untuk menentukan morfologi mikroplastik yaitu, jenis, dan ukuran. Jenis mikroplastik yang akan diidentifikasi dapat berupa *fragmen, fiber, film, foam* atau *pelet.*

Pengujian sampel tanah pada *Constructed Wetland* Sampel dilakukan pengujian sebagai berikut :



Gambar 3. 10 Alur pengujian sampel tanah

3.4 Mekanisme Penyisihan

Proses penyisihan mikroplastik pada setiap unit pengolahan air lindi terjadi melalui berbagai mekanisme fisik, kimia, dan biologis. Pada bak penampung, penyisihan berlangsung terutama melalui proses sedimentasi dan flotasi, di mana partikel mikroplastik yang berat seperti PVC dan PET cenderung mengendap bersama padatan tersuspensi, sedangkan partikel ringan seperti PE dan PP mengapung di permukaan air (Li et al., 2021). Selanjutnya, pada reaktor anaerobik, mikroplastik banyak tertangkap di dalam lapisan lumpur aktif karena adanya proses adsorpsi dan penjebakan (*entrapment*) oleh partikel lumpur. Mikroba anaerob juga membentuk biofilm pada permukaan plastik, sehingga partikel menjadi lebih berat dan mudah mengendap (Zhou et al., 2022).

Pada reaktor aerobik, penyisihan terjadi karena penggabungan mikroplastik ke dalam flok lumpur aktif, serta adanya aktivitas mikroorganisme aerob yang menghasilkan enzim yang membantu memecah polimer plastik (Shen et al., 2020). Di unit clarifier, mikroplastik yang telah bergabung dengan flok lumpur akan mengendap akibat gaya gravitasi, sehingga jumlah mikroplastik berkurang cukup signifikan (Edo et al., 2020).

Pada tahap berikutnya, di *constructed wetland* (CW), penyisihan terjadi melalui filtrasi alami oleh media pasir dan tanah, serta adsorpsi oleh biofilm pada akar tanaman *Typha angustifolia*, yang mampu menjerap dan menahan partikel mikroplastik dalam aliran air (Li et al., 2023). Sementara itu, pada *floating treatment wetland* (FTW), akar tanaman yang menggantung di air berfungsi seperti saringan alami. Mikroplastik menempel pada akar dan biofilm mikroba, lalu sebagian mengalami degradasi biologis oleh bakteri yang menghasilkan enzim oksidase dan hidrolase.Secara keseluruhan, kombinasi sistem biologis CW dan FTW ini mampu meningkatkan efisiensi penghilangan mikroplastik lebih dari 50% melalui mekanisme filtrasi, penjerapan, pembentukan biofilm, dan biodegradasi mikroorganisme (Li et al., 2023).

3.5 Analisis

Data hasil pengujian kemudian dianalisis untuk mengevaluasi efisiensi kadar mikroplastik.Analisis statistik dilakukan untuk menguji perbedaan kadar mikroplastik sebelum dan sesudah perlakuan serta membandingkan efektivitas

berbagai kombinasi metode yang diterapkan. Hasil analisis ini menjadi dasar untuk menilai keberhasilan sistem dan menentukan potensi pengembangannya dalam skala yang lebih luas.hasil juga dikurangkan dengan hasil mikroplastik pada tanah hal ini diasumsikan bahwasannya Mikroplastik dihasilkan oleh pengolahan terakhir yaitu pada tanah reaktor *constructed wetland.*

Efisiensi penyisihan mikroplastik pada setiap unit pengolahan dihitung dengan menggunakan perbandingan antara konsentrasi atau kelimpahan mikroplastik di inlet dan outlet masing-masing unit. Perhitungan ini bertujuan untuk mengetahui seberapa besar kemampuan tiap unit, baik proses biologis maupun fitoremediasi dalam *constructed wetland*, dalam mengurangi jumlah mikroplastik dari air lindi. Rumus yang digunakan adalah:

$$\%Removal = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} \; x \; 100\%$$

Keterangan :

%*Removal* = Efisiensi penyisihan mikroplastik pada unit ke-I (%)

C_{in} = konsentrasi atau kelimpahan mikroplastik pada inlet unit(Partikel/mg atau partikel/L),

C_{out} = konsentrasi atau kelimpahan mikroplastik pada outlet unit(Partikel/mg atau partikel/L).

BAB IV
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakteristik Air lindi

Proses pengambilan sampel dilakukan di bak anaerobik pada IPL TPA Piyungan,sampel air lindi yang sudah diambil dioperasikan dan dijalankan pada reaktor *constructed wetland*,sebelum itu dilakukan aklimatisasi pada reaktor dengan karakteristik lindi pada masing masing reaktor yaitu berwarna coklat terang dengan karakteristik sebagai berikut :

Tabel 4. 1 Karakteristik air lindi TPA Piyungan

Parameter	Satuan	Kadar maksimal yang diperbolehkan
Fisika		
Zat Padat Terlarut (TDS)	mg/l	2000
Temperatur	˚C	30
Zat Padat Tersuspensi (TSS)	mg/l	200
Kimia		
Air Raksa	mg/l	0,002
Arsen	mg/l	0,1
Barium	mg/l	2
Kadmium	mg/l	0,05
Kromium (val 6)	mg/l	0,1
Tembaga	mg/l	2
Sianida	mg/l	0,05
Flourida	mg/l	2
Timbal	mg/l	0,1
Nikel	mg/l	0,2
Nitrat	mg/l	20
Nitrit	mg/l	1
Ammonia	mg/l	1
Mangan	mg/l	2
Sulfida	mg/l	0,05
Klorin Bebas	mg/l	1
Seng	mg/l	5
Krom Total	mg/l	0,5
BOD5	mg/l	50
COD	mg/l	100

Sumber : Simon 2007.

Tabel 4. 2 Karakteristik sampel pada lindi 20%

Reaktor	pH	Suhu ℃
Bak Penampung	8	28
Anaerobik-aerob	8	28,1
Clariefier	8	27,7
FTW bakteri	7	27,6
CW bakteri	7	27,5
FTW Non bakteri	6	27,2
CW Non bakteri	6	27,4

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa nilai pH pada sistem mengalami penurunan bertahap dari 8 pada bak penampung, reaktor anaerobik-aerob, dan clarifier menjadi 7 pada FTW dan CW bakteri, serta mencapai 6 pada FTW dan CW non-bakteri. Penurunan ini mengindikasikan adanya proses biologis yang aktif, di mana aktivitas mikroba dan tanaman dalam sistem constructed wetland menghasilkan senyawa asam organik yang berkontribusi pada penurunan pH (Zhao et al., 2016). Nilai pH yang netral hingga sedikit asam penting untuk menjaga ketersediaan nutrien dan mendukung proses degradasi polutan oleh mikroorganisme (Kadlec & Wallace, 2009). Sementara itu, suhu pada seluruh reaktor relatif stabil, berada pada kisaran 27,2–28,1 °C, yang tergolong dalam rentang mesofilik. Kondisi ini sangat sesuai untuk aktivitas mikroba pengurai, karena suhu optimal bagi mikroorganisme dalam sistem CW berada pada kisaran 25–35 °C (Wu et al., 2014). Stabilitas suhu menunjukkan bahwa lingkungan reaktor cukup konsisten dan mendukung proses biologis. Secara keseluruhan, perubahan pH dan kestabilan suhu menegaskan bahwa sistem CW dengan bakteri mampu menjaga kondisi yang lebih seimbang dibandingkan CW tanpa bakteri, sehingga berimplikasi pada efektivitas removal mikroplastik maupun polutan lainnya.

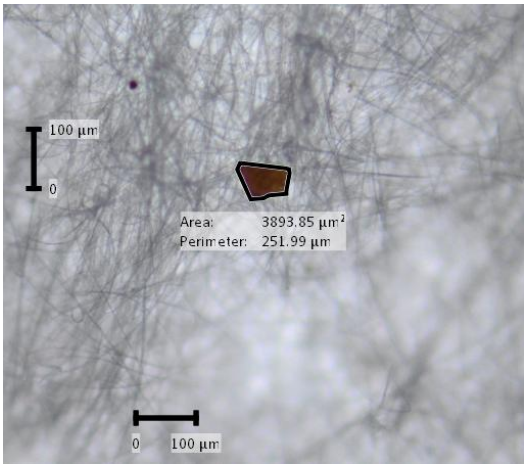
4.2 Identifikasi berdasarkan jumlah dan Jenis Mikroplastik Lindi

Pada penelitian ini dilakukan proses identifikasi dan klasifikasi mikroplastik yang terdapat dalam air lindi pada IPAL TPA Piyungan, yang di lakukan pada reaktor *Constructed Wetland*,dengan pengamatan menggunakan mikroskop. Sampel dianalisis melalui proses penyaringan menggunakan kertas saring berukuran 212um,25um,11um dan 1,6um yang dipasang pada alat *vacum filter*.

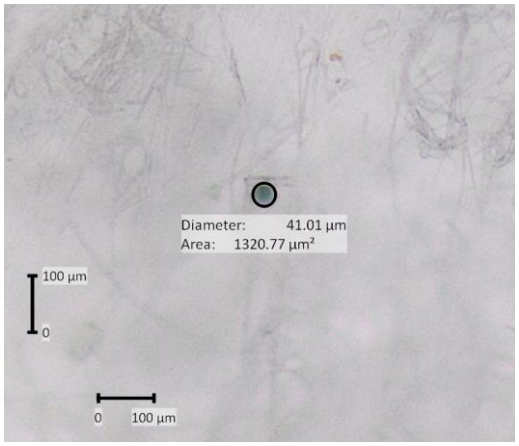
Setelah proses penyaringan selesai, mikroplastik yang tertangkap kemudian diklasifikasikan dan dicatat berdasarkan kategori jenis, bentuk, Data mikroplastik yang telah dikumpulkan selanjutnya diolah melalui perhitungan untuk mengetahui tingkat kelimpahan mikroplastik di masing-masing reaktor.berikut hasil dari dari jenis mikroplastik yang diidentifikasi,pada gambar berikut:



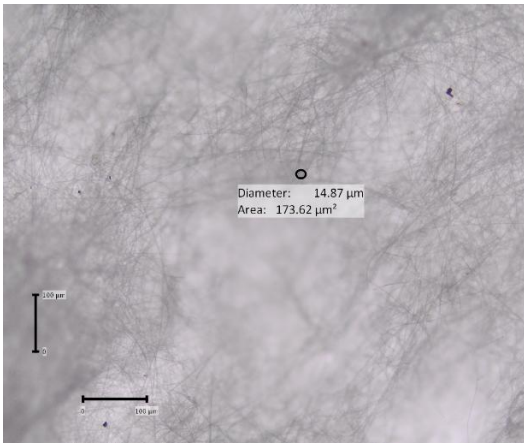
(a)



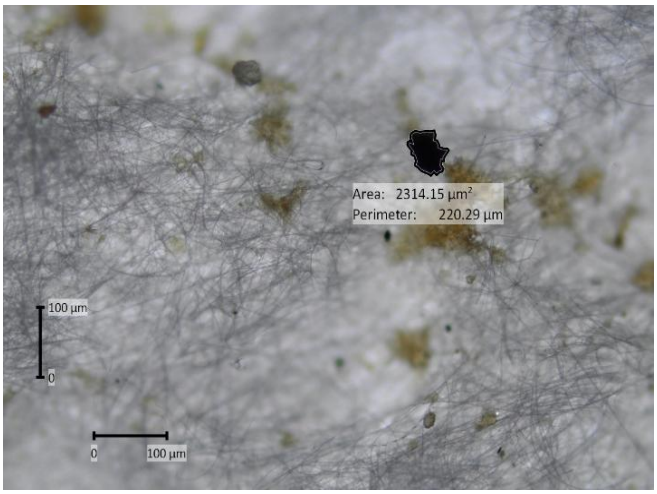
(b)



(c)



(d)



(e)

a) *Fiber*

Mikroplastik jenis pellet memiliki ciri-ciri bentuk silindris yang sempurna dengan warna yang beragam, namun memiliki warna pekat dengan permukaan yang halus. Mikroplastik jenis pellet termasuk dalam mikroplastik primer yang merupakan bahan baku dari pembuatan plastik pada pabrik (Hiwari et al., 2019).

b) *Film*

Film merupakan jenis mikroplastik yang memiliki bentuk seperti pecahan atau lembaran plastik. Sumber dari jenis ini dipengaruhi dari sampah anorganik seperti kantong plastik dan kemasan sekali pakai berbahan plastik lainnya (Ambasari & Anggiani, 2022).

c) *Pellet*

Mikroplastik jenis pellet termasuk dalam mikroplastik primer yang merupakan bahan baku dari pembuatan plastik pada pabrik (Hiwari et al., 2019). Sumber dari mikroplastik jenis ini berasal dari microbeads yang dibuat untuk produk kecantikan (Sugandi et al., 2021),

d) *Foam*

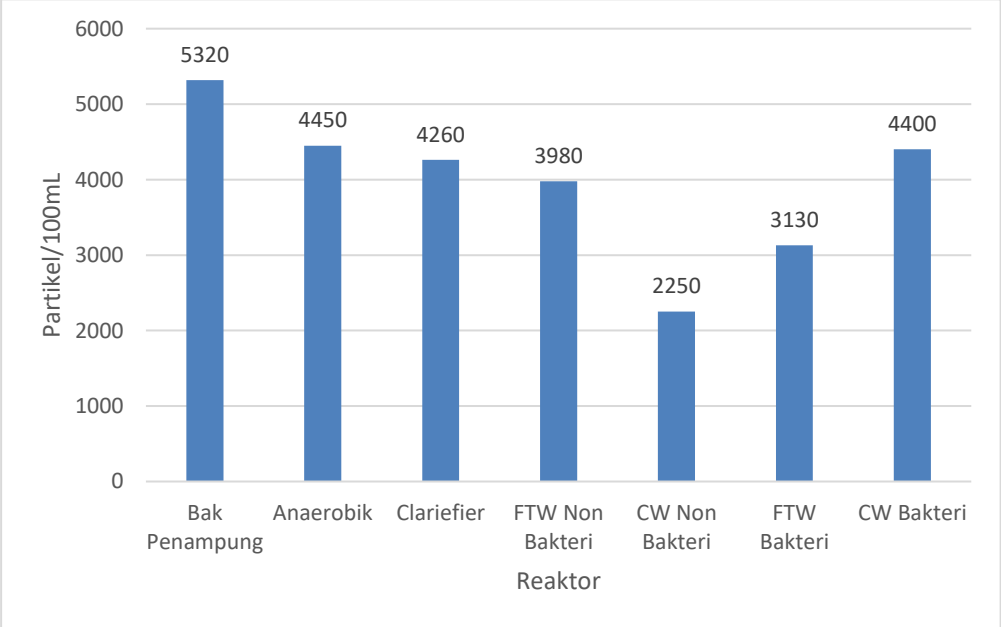
Mikroplastik jenis ini memiliki karakter berpori dan memiliki densitas yang tinggi. Sumber dari mikroplastik foam ini berasal dari potongan atau serpihan sampah makro seperti styrofoam, wadah makanan, cangkir, kemasan makanan dan puntung rokok (Zurub R., et al. 2024).

e) *Fragment*

Mikroplastik jenis ini memiliki karakteristik yang keras dan berasal dari pembuangan kantong plastik berbahan pekat, alat makanan yang keras (Zurub R., et al. 2024), bungkus detergen dan pecahan dari sampah plastik 32 sekali pakai yang bertekstur tebal lainnya (Sugandi et al., 2021).

4.2.1 Identifikasi Mikroplastik pada air lindi berdasarkan jumlah total

Pada tahap identifikasi mikroplastik, dilakukan penghitungan jumlah partikel mikroplastik di setiap titik pengambilan sampel dengan menggunakan metode pembagian kuadran pada permukaan kertas Whatman. Setiap lembar kertas Whatman dari masing-masing sampel dibagi menjadi 4 bagian (kuadran). Proses perhitungan mikroplastik dilakukan dengan bantuan *mikroskop trinokuler* menggunakan perbesaran 4x dan 10x. kemudian didata jumlahnya sesuai dengan jumlah setiap ukuran kertas saring,didata pada **Gambar 4.2.**



Gambar 4. 1 Jumlah Total Mikroplastik pada lindi

Berdasarkan data hasil analisis pada grafik diatas, diketahui bahwa kelimpahan mikroplastik tertinggi terdapat pada unit Bak Penampung dengan jumlah sebesar 5320 partikel/L atau 19,14%, diikuti oleh unit Anaerobik dan CW Bakteri masing-masing sebesar 4450 partikel/L atau 16,01% dan 4400 partikel/L atau 15,83%. Unit Clarifier mencatat kelimpahan sebesar 4260 partikel/L 15,33%, sementara unit FTW Non Bakteri dan FTW Bakteri menunjukkan nilai yang lebih

rendah, yaitu 3980 partikel/L atau 14,32% dan 3130 partikel/L atau 11,26%. Kelimpahan mikroplastik terendah ditemukan pada unit CW Non Bakteri, yakni sebesar 2250 partikel/L atau 8,10%.

Unit Anaerobik dan Clarifier masing-masing mencatat kelimpahan sebesar 4450 partikel/L dan 4260 partikel/L, menunjukkan bahwa proses biologis anaerobik dan sedimentasi belum mampu menurunkan kandungan mikroplastik secara signifikan. Hal ini disebabkan oleh ukuran mikroplastik yang sangat kecil dan sifatnya yang ringan, sehingga sulit untuk terendapkan secara efektif. Menurut Enfrin et al. (2019), teknologi pengolahan limbah konvensional memiliki keterbatasan dalam menangani mikroplastik, terutama dalam hal penyaringan dan pengendapan.

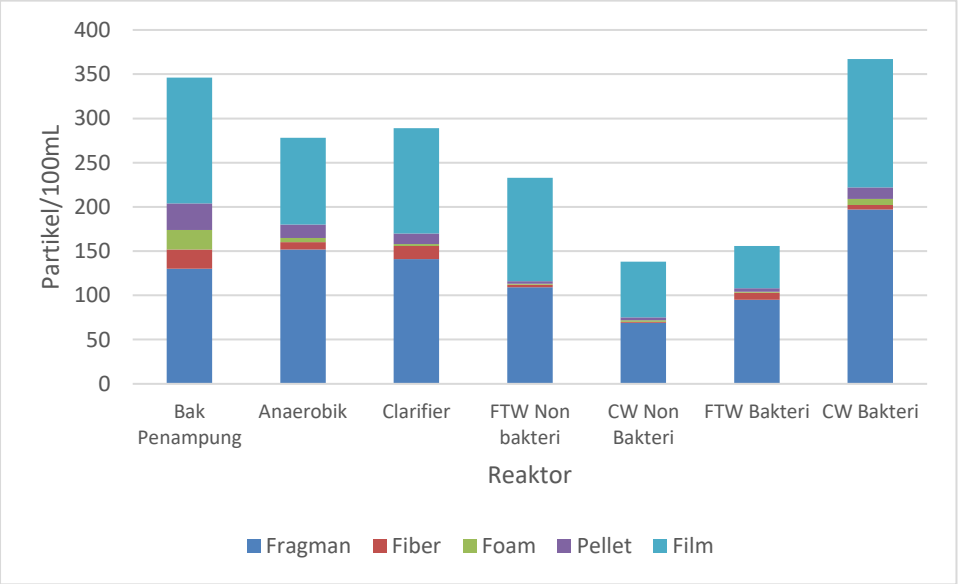
Di sisi lain, unit berbasis sistem alami seperti *Constructed Wetland* (CW) dan *Floating Treatment Wetland* (FTW) menunjukkan kinerja yang lebih baik dalam menurunkan kelimpahan mikroplastik. Unit CW Non Bakteri mencatat nilai terendah yaitu 2250 partikel/L, diikuti oleh FTW Bakteri dan FTW Non Bakteri. Efektivitas sistem ini dapat dikaitkan dengan peran substrat dan tanaman dalam menjebak mikroplastik melalui mekanisme filtrasi, adsorpsi, dan penghambatan aliran menurut Ziajahromi et al. (2017) dan Blettler et al. (2018), yang menunjukkan bahwa sistem *wetland* mampu berperan sebagai penyaring alami terhadap mikroplastik.

Pada sistem *constructed wetland* di reaktor CW bakteri menunjukkkan angka yang tinggi dibanding ke empat reaktor *constructed wetland* lainnya,pada tabel 4.9 menunjukkan kelimpahan pada tanah yang dihasilkan sebelum dilakukan pengaliran air lindi sebesar 1004 partikel,yang dimana ini merupakan hasil pengapungan mikroplastik yang berada pada tanah sebelum adanya air lindi yang dialirkan pada reaktor.

4.2.2 Identifikasi Jenis Mikroplastik

a) Pada kertas saring berukuran 212um

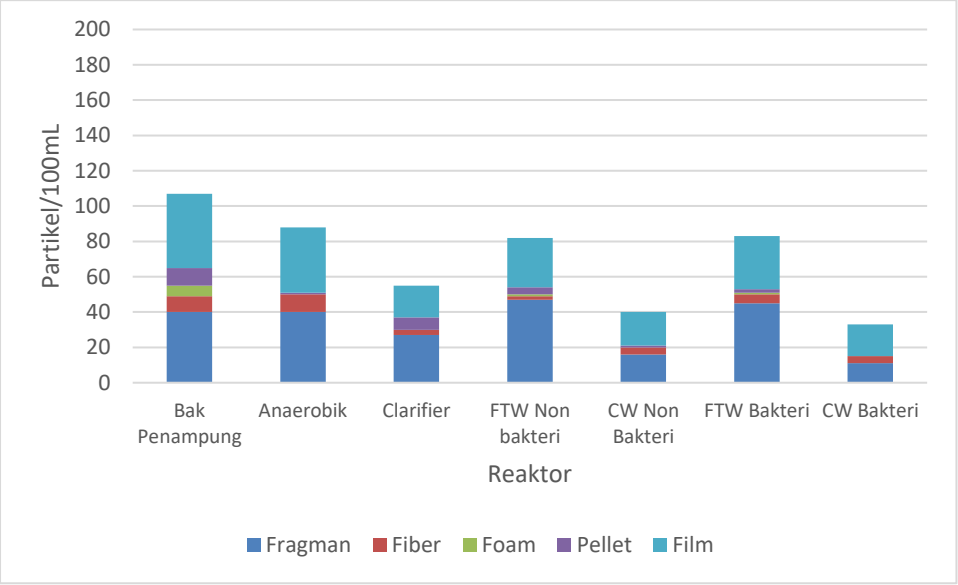
Berdasarkan hasil analisis menggunakan kertas saring berukuran 212 µm, partikel jenis fragman merupakan jenis partikel yang paling dominan ditemukan di pengujian kertas saring 212um. Jumlah partikel fragman tertinggi ditemukan pada unit *Constructed Wetland* (CW) Bakteri sebesar 197 partikel, diikuti oleh unit Anaerobik sebanyak 152 partikel, serta unit Clarifier sebanyak 141 partikel. Selain itu, partikel jenis *film* juga menunjukkan jumlah yang cukup tinggi, khususnya pada unit Bak penampung dengan 142 partikel dan CW Bakteri sebanyak 145 partikel. Sebaliknya,jenis mikroplastik seperti *fiber, foam, dan pellet* menunjukkan jumlah partikel yang relatif rendah, masing-masing umumnya berada di bawah 30 partikel pada setiap titik sampling. Jenis *foam* merupakan partikel dengan jumlah paling sedikit di seluruh lokasi, menandakan bahwa partikel jenis ini kemungkinan besar berukuran lebih kecil atau jumlahnya memang sangat terbatas. Temuan ini menunjukkan bahwa sistem pengolahan air belum sepenuhnya mampu menyaring partikel plastik berukuran besar, khususnya dari jenis *fragman* dan *film,* yang kemungkinan berasal dari limbah domestik atau plastik terdegradasi.



Gambar 4. 2 Grafik jumlah & jenis mikroplastik pada kertas saring 212um

b) Pada kertas saring berukuran 25um

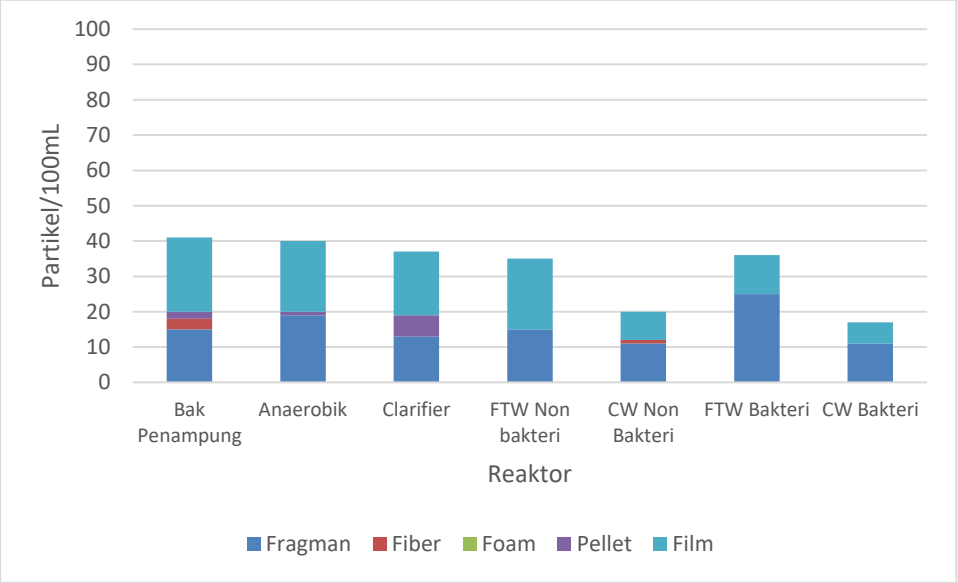
Pada kertas saring berukuran 25 µm, yang digunakan untuk menyaring partikel berukuran lebih kecil dari 212 um, jumlah partikel secara keseluruhan lebih rendah dibandingkan dengan kertas saring 212 um. Namun demikian, partikel jenis *fragman* tetap merupakan jenis partikel yang paling banyak ditemukan. Partikel *fragman* paling banyak ditemukan di *unit Floating Treatment Wetland* (FTW) Bakteri sebanyak 45 partikel dan FTW Non bakteri sebanyak 47 partikel. Selain itu, partikel *film* juga ditemukan dalam jumlah yang relatif tinggi, terutama pada unit FTW Bakteri 30 partikel dan Bak Penampung 42 partikel. Jenis partikel lainnya seperti *fiber, foam*, dan *pellet* menunjukkan jumlah yang jauh lebih rendah, bahkan pada beberapa reaktor tidak ditemukan sama sekali, terutama untuk partikel *foam* yang tidak terdeteksi di sebagian besar titik sampling. Hasil ini menunjukkan bahwa sebagian besar partikel mikroplastik yang lolos ke sistem pengolahan berukuran relatif besar, dan hanya sebagian kecil yang berukuran mikro atau halus.



Gambar 4. 3 Grafik jumlah & jenis mikroplastik pada kertas saring 25um

c) Pada kertas saring berukuran 11um

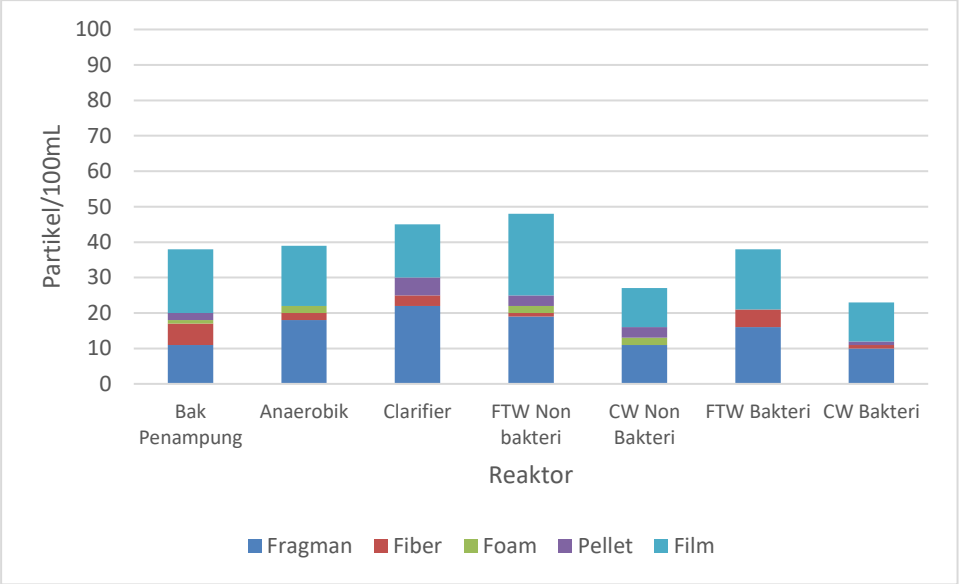
Berdasarkan hasil analisis menggunakan kertas saring berukuran 11 um, partikel jenis fragman merupakan jenis partikel yang paling dominan ditemukan pada semua unit pengolahan. Jumlah partikel *fragman* tertinggi ditemukan pada unit FTW Bakteri sebanyak 25 partikel, diikuti oleh unit Anaerobik sebanyak 19 partikel, serta unit Bak penampung sebanyak 15 partikel. Selain itu, partikel jenis *film* juga menunjukkan jumlah yang cukup tinggi, khususnya pada unit Bak penampung 21 partikel, Anaerobik 20 partikel, dan FTW Non bakteri 20 partikel. Sebaliknya, partikel jenis *fiber, foam*, dan *pellet* menunjukkan jumlah yang sangat rendah atau tidak ditemukan sama sekali di sebagian besar titik sampling. Partikel *foam* bahkan tidak terdeteksi di seluruh unit, menunjukkan bahwa partikel ini kemungkinan lebih kecil dari 11 um atau keberadaannya sangat terbatas. Temuan ini mengindikasikan bahwa partikel mikroplastik berukuran sangat kecil, khususnya dari jenis *fragman* dan *film*, masih mendominasi meskipun telah melalui berbagai tahapan pengolahan air, dan kemungkinan besar berasal dari degradasi plastik domestik.



Gambar 4. 4 Grafik jumlah & jenis mikroplastik pada kertas saring 11um

d) Pada kertas saring berukuran 1,6um

Berdasarkan hasil analisis menggunakan kertas saring berukuran 1,6 um, partikel jenis *fragman* tetap menjadi jenis partikel yang paling dominan di hampir semua unit pengolahan. Jumlah partikel *fragman* tertinggi ditemukan pada unit Clarifier sebanyak 22 partikel, disusul oleh Anaerobik dengan 18 partikel, dan FTW Non bakteri sebanyak 19 partikel. Selain *fragmant*, partikel jenis *film* juga menunjukkan jumlah signifikan, khususnya di FTW Nonbakteri (23 partikel), Bak penampung 18 partikel, dan FTW Bakteri 17 partikel. Partikel *fiber* dan *pellet* menunjukkan keberadaan yang sedikit, meskipun jumlahnya cenderung lebih rendah dibanding *fragman* dan *film*. *Fiber* tertinggi tercatat pada unit FTW Bakteri 5 partikel, sedangkan pellet paling banyak ditemukan di CW Non Bakteri 3 partikel. Jenis partikel *foam* ditemukan dalam jumlah yang sangat sedikit di seluruh unit, tidak melebihi 2 partikel per titik.



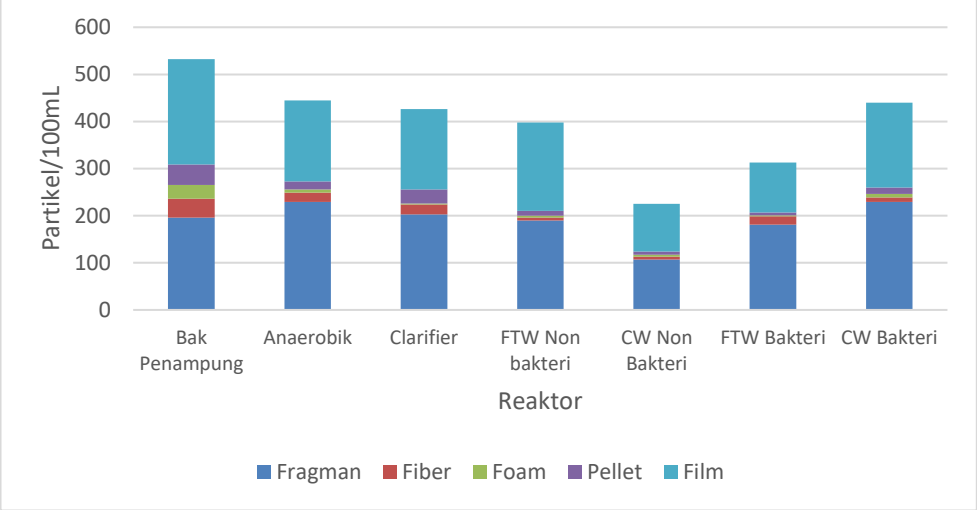
Gambar 4. 5 Grafik jumlah & jenis mikroplastik pada kertas saring 1,6um

Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa bahkan dengan penyaringan partikel hingga ukuran 1,6 µm, mikroplastik jenis *fragman* dan *film* tetap mendominasi, yang menunjukkan tingkat fragmentasi plastik yang tinggi dan keberadaan mikroplastik yang meluas di sistem pengolahan air. Hasil ini mengindikasikan bahwa sistem pengolahan air masih memungkinkan lolosnya partikel mikroplastik berukuran sangat kecil, terutama dari jenis *fragman* dan *film*,

yang kemungkinan berasal dari degradasi plastik domestik. Adanya perbedaan distribusi dan jumlah partikel antar ukuran saring memperkuat indikasi bahwa mikroplastik hadir dalam spektrum ukuran yang luas, dan bahwa saringan berpori lebih kecil lebih efektif dalam mengungkap akumulasi mikroplastik tersembunyi di sistem pengolahan.

4.2.3 Identifikasi total keseluruhan Jenis mikroplastik

Pada penelitian ini jenis mikroplastik paling banyak terdapat pada Instalasi Pengolahan Air Lindi (IPL) yang sudah diolah di *constructed wetland* yaitu *Fragment* berjumlah 1335 partikel dan *film* 1140 partikel sedangkan jenis mikroplastik paling sedikit yaitu tingkat pertama yaitu jenis *foam* berjumlah 55 partikel kedua yaitu *fiber* berjumlah 121 partikel dan yang ketiga yaitu *pellet* berjumlah 128 partikel, Perbedaan jumlah masing-masing jenis mikroplastik ini dapat dipengaruhi oleh jenis sampah yang terdapat pada *landfiil* dan keadaan lingkungan sekitar. Tingginya persentase mikroplastik jenis film dan *fragmen* disebabkan oleh jenis sampah plastik yang masuk pada TPA Piyungan, karena jenis tersebut memiliki beberapa sumber sampah yang sama seperti botol plastik Menurut data SIPSN pada tahun 2022, TPA Piyungan menyumbang sebanyak 25,82% dari total sampah plastik yang ada di Indonesia. Salah satu faktor persentase komposisi plastik pada TPA Piyungan tersebut berasal dari menjamurnya kedai kopi di Yogyakarta yang diikuti dengan penggunaan sampah plastik sekali pakai seperti gelas, sedotan, kantong, bahkan alat makan (Hasbi Kamil, 2023). Selain itu berdasarkan survei lokasi penelitian, faktor lingkungan sekitar seperti tempat pengepulan sampah plastik juga dapat mempengaruhi tingginya jumlah mikroplastik jenis *film* dan *fragmen*. Pendapat yang mendukung tingginya mikroplastik pada air lindi yaitu mikroplastik dengan jenis *film* sangat rentan terhadap faktor lingkungan dan permukaannya terlihat bekas retakan yang menunjukkan tingkat penuaan yang lebih tinggi dibandingkan dengan mikroplastik yang lainya (Ding et al., 2019). Sedangkan mikroplastik dengan jenis *fragmen* mudah ditemukan karena memiliki massa benda yang rendah dan dapat mengambang di permukaan air (Shadrina A, 2023).



Gambar 4. 6 Grafik total jenis mikroplastik

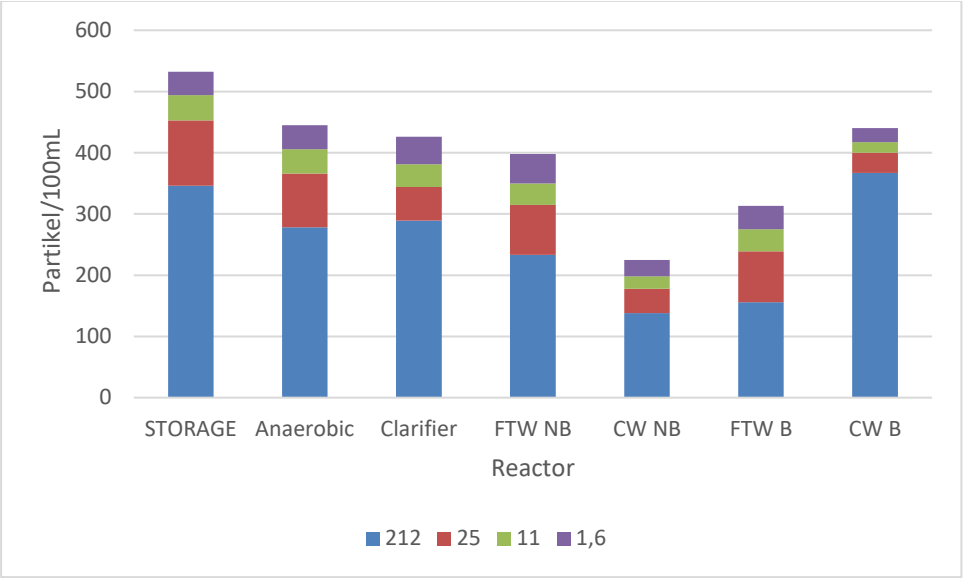
Jenis *fiber* dan *pellet* memiliki persentase yang rendah akan tetapi selisih dari kedua jenis ini tidak jauh, jumlah fiber dapat dipengaruhi jenis sampah kain berdasarkan data SIPSN tahun 2023 yaitu sebesar 0,16% dan jenis sampah lainya sebesar 1,9% dari total komposisi sampah yang ada pada TPA Piyungan. Hal ini dapat terjadi dikarenakan menurut Adila, (2021) Fiber memiliki ciri-ciri 49 berbentuk serat garis memanjang yang salah satunya berasal dari kain sintesis, tali pancing, jarring nelayan dan tali tambang.

Sedangkan *pellet* tidak memiliki persentase yang lebih tinggi dibanding *fiber*, hal ini dapat disebabkan dari adanya sampah produk kecantikan pada TPA Piyungan. Karena pada wadah produk kecantikan yang dibuang biasanya tidak habis total, tetapi terdapat sisa produk kecantikan yang ikut terbuang di dalam wadahnya.

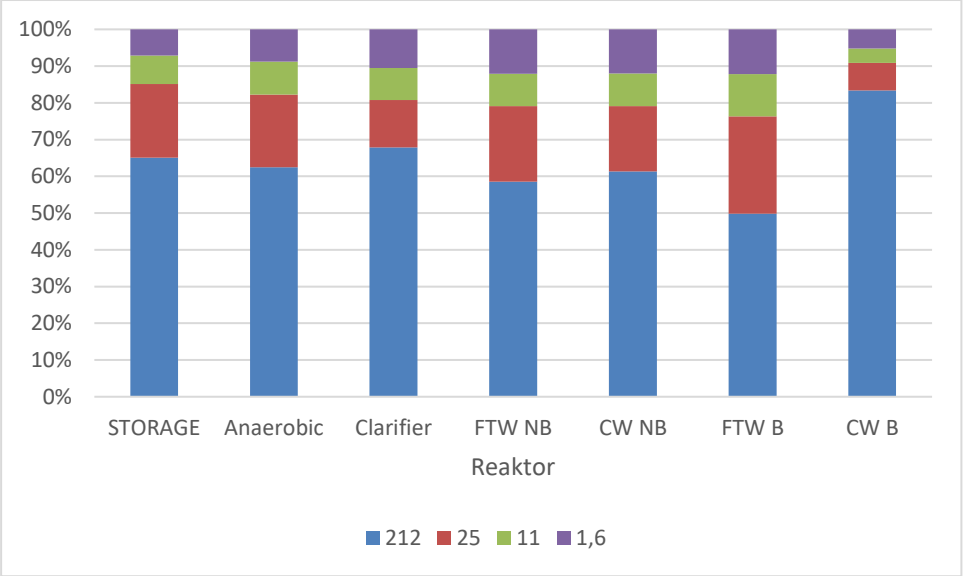
Mikroplastik dengan jenis *foam* pada penelitian ini memiliki persentase paling rendah karena densitas jenis polimer pada sumber mikroplastik. Menurut Basri et al., (2020) *Polystyrene* (PS) merupakan polimer mikroplastik yang bersumber dari sampah seperti Styrofoam, dimana sampah *styrofoam* merupakan cikal bakal mikroplastik dengan jenis foam. Maka dari itu foam memiliki polimer PS, dimana PS memiliki densitas yang lebih rendah dari polimer PE, PP yang merupakan polimer dari sampah botol plastik. Botol plastik dan kemasan plastik merupakan cikal bakal mikroplastik jenis *film* dan *fragmen* yang dominan pada penelitian ini.

Berdasarkan penelitian dari He et al., (2019), terdapat beberapa jenis mikroplastik yang telah teridentifikasi yaitu, *fiber, fragment, pellet, foam* dan juga *film*. Jenis yang paling dominan ditemukan pada mikroplastik pada jenis fragment sebesar 22,87% karena disetiap titik ditemukan jenis fragment dan jenis film. Kemudian, jenis yang paling sedikit yang ditemukan adalah jenis pellet sebesar 0,64% yang ditemukan hanya pada titik S2 dan S4. Sampah yang tertimbun pada TPA akan melewatkan proses yang cukup panjang dan akan melepaskan mikroplastik karena, dengan ukuran sampah yang lebih kecil akan mudah terbawa melalui air lindi dan akan berakhir pada aliran air yang berada pada sekitar lingkungan Tempat Pemrosesan Sampah (TPA). Sedangkan, pada hasil penelitian Afrin et al., (2020), pada tanah TPA ditemukan jenis mikroplastik yang paling banyak yaitu jenis *film* karena pada jenis ini biasanya dihasilkan dari pertanian, sampah plastik seperti botol plastik dan produk kemasan.dapat ditarik kesimpulannya untuk karakteristik jenis mikroplastik pada TPA piyungan dan sekitar TPA piyungan seperti tanah dan sungai jenis mikroplastik yang dominan yaitu *Fragment* dan *film*.

Pada penelitian Lares et al. (2019) membandingkan metode filtrasi dengan mesh ukuran 25 µm, 100 µm, dan 250 µm, dan menemukan bahwa mesh 25 µm memberikan *recovery* partikel mikroplastik tertinggi (~83 %) untuk *fragmen* maupun fiber pada sampel air limbah dan lumpur.dapat disimpulkan bahwasannya Partikel *fragmen* dan *film* muncul dominan pada semua ukuran saring, tetapi semakin halus ukuran kertas saring (25um 11um 1,6 um), jumlah relatif *fragmen* & *film* meningkat selaras literatur tentang distribusi ukuran.Ukuran saring 25 µm sudah cukup optimal untuk menangkap fragmen >20 µm secara besar akan tetapi lebih bisa dioptimalkan menggunakan kertas saring 212um untuk penangkapan partikel yang cukup besar, sementara kertas saring ≤11 µm mulai mengungkap *fragmen* halus dan *film* yang tersembunyi.dapat kita lihat di gambar 4.7



Gambar 4. 7 Fraksi Jumlah mikroplastik berdasarkan ukuran



Gambar 4. 8 Persentase Fraksi Jumlah mikroplastik berdasarkan ukuran

Berdasarkan hasil analisis fraksi mikroplastik pada berbagai ukuran kertas saring, terlihat bahwa jumlah partikel mikroplastik menurun secara signifikan seiring dengan semakin kecilnya ukuran pori saring. Ukuran 212 µm mencatat jumlah total partikel tertinggi, yaitu 1.807 partikel atau 64% dari keseluruhan partikel yang terdeteksi. Pada ukuran 25 µm, jumlah partikel menurun menjadi 488 partikel atau 18% ,kemudian kembali turun pada ukuran 11 µm dengan 226 atau 8% partikel,dan sedikit meningkat pada ukuran 1,6 µm dengan 258 partikel atau 10% partikel.

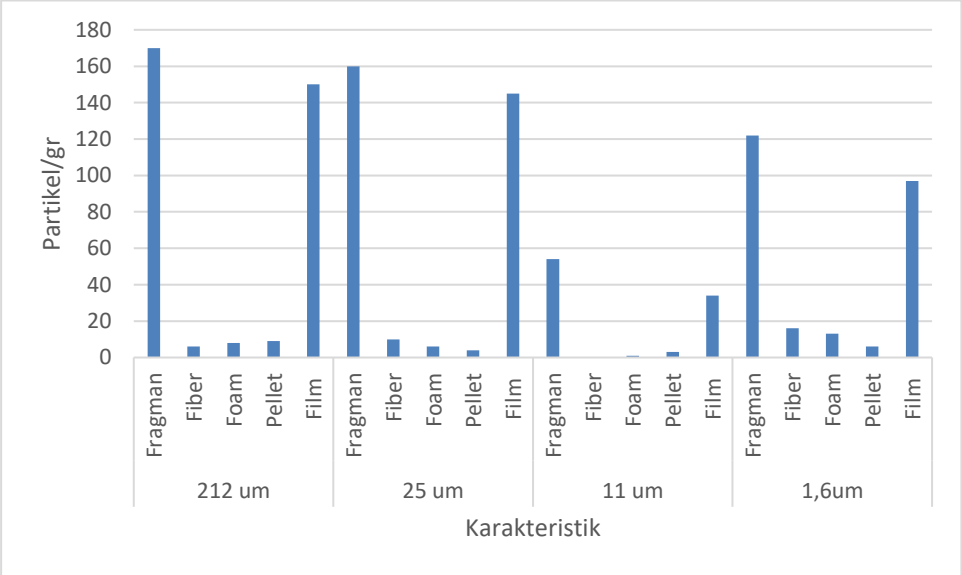
Kenaikan jumlah partikel pada saring 1,6 µm dibandingkan 11 µm menunjukkan bahwa sebagian besar partikel mikroplastik berada dalam rentang ukuran sangat kecil (<10 µm) dan mungkin tidak tertangkap oleh filter 11 µm. Temuan ini menguatkan hasil studi Perez munuzuari 2024 bahwa fraksi mikroplastik sangat kecil (mikro dan nano) seringkali tersembunyi dan baru terdeteksi ketika menggunakan filter dengan ukuran pori sangat halus. Proporsi partikel yang terdeteksi menunjukkan tren distribusi ukuran mikroplastik mengikuti *power-law*, yaitu semakin kecil ukurannya, semakin tinggi jumlah partikelnya namun keterbatasan metode deteksi dapat menyebabkan underestimasi pada ukuran yang sangat kecil. Oleh karena itu, pendekatan multi-filter dengan berbagai ukuran sangat penting untuk memperoleh gambaran distribusi mikroplastik yang lebih akurat dalam sistem pengolahan air.

Akan tetapi dalam hal ini tidak bisa dipungkiri bahwasannya mikroplastik bisa berasal dari mana saja,Menurut Wang et al (2021) kontaminasi sampel blanko oleh mikroplastik diduga memungkinkan terjadi atas beberapa faktor, seperti:

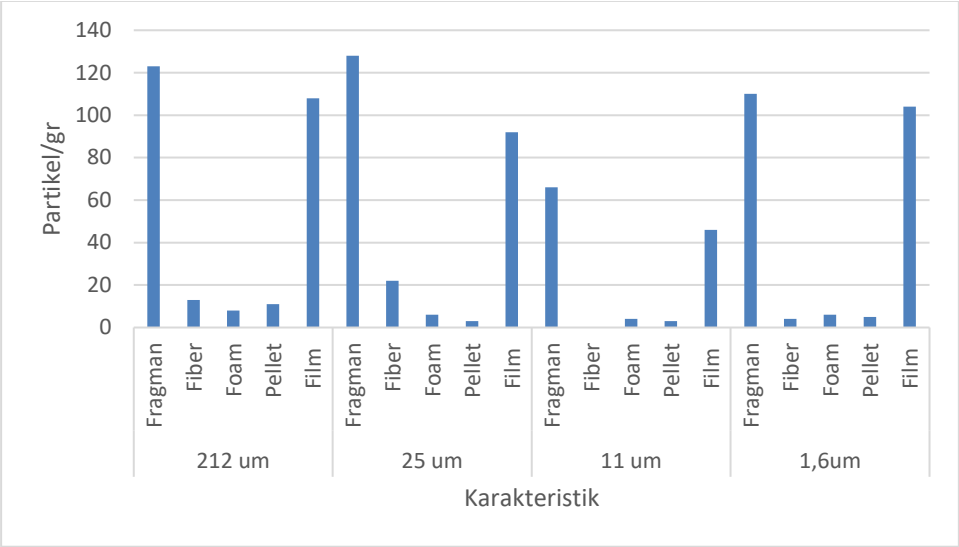
1. Penggunaan peralatan. Peralatan yang digunakan untuk mengumpulkan dan mengamati sampel dapat mengandung mikroplastik. Peralatan yang disimpan tidak pada ruangan kedap udara memungkinkan dicemari oleh mikroplastik dari udara maupun sampel apabila tidak dilakukan pembersihan yang tepat.
2. Kontaminasi laboratorium. Laboratorium memungkinkan menjadi tempat yang telah tercemar oleh mikroplastik. Adanya aktivitas di laboratorium dan kondisi sirkulasi yang kurang baik. Memungkinkan ada cemaran mikroplastik yang tertinggal di laboratorium dan mencemari sampel.
3. Penggunaan bahan kimia. Bahan kimia yang digunakan dalam prosedur analisis dapat mengandung mikroplastik. Misalnya, bahan kimia yang digunakan untuk mengumpulkan partikel mikroplastik dapat mengandung partikel mikroplastik yang terbawa oleh bahan kimia.

4.3.1 Identifikasi Jumlah Mikroplastik pada tanah reaktor *Constructed wetland* 20%

Berdasarkan hasil pengujian mikroplastik pada sampel tanah CW Bakteri, total 1.014 partikel mikroplastik terdeteksi dari seluruh ukuran saring yang digunakan. Jenis mikroplastik yang paling dominan secara keseluruhan adalah *fragmen* dan *film*, dengan dominasi yang konsisten di semua ukuran kertas saring. Pada ukuran saring 212 um, jumlah *fragmen* mencapai 170 partikel, dan *film* sebanyak 150 partikel, menjadikan ukuran ini sebagai penyumbang jumlah partikel terbesar 343 partikel. Ukuran 25 um mencatatkan total 325 partikel, dengan *fragmen* dan *film* tetap mendominasi 160 dan 145 partikel.serta sedikit penambahan *fiber, foam*, dan *pellet*.



Gambar 4. 9 Jumlah Berdasarkan Karakteristik *Constructed wetland* bakteri 20%



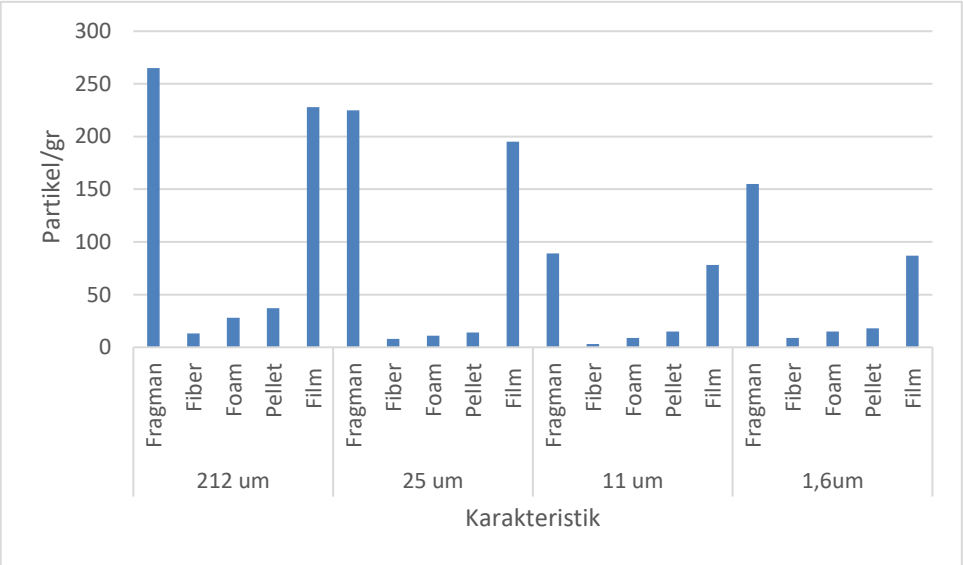
Gambar 4. 10 Jumlah berdasarkan karakteristik Constructed Wetland Non Bakteri 20%

Hasil analisis pada data menunjukkan bahwa total 862 partikel mikroplastik terdeteksi dari semua ukuran saring yang digunakan pada reaktor CW Non Bakteri. Seperti pada reaktor CW Bakteri, jenis mikroplastik yang paling dominan adalah *fragmen* dan *film*, dengan jumlah signifikan pada seluruh ukuran kertas saring. Pada ukuran 212 um, fragmen terdeteksi sebanyak 123 partikel dan film sebanyak 108 partikel, memberikan total 263 partikel dari ukuran ini. Ukuran saring 25 um mencatatkan 251 partikel, dengan dominasi *fragmen* 128 partikel dan *film* 92 partikel tetap konsisten. Partikel *fiber, foam,* dan *pellet* muncul dalam jumlah sangat terbatas. Pada ukuran saring yang lebih halus 11 um dan 1,6 um, total partikel yang terdeteksi masing-masing adalah 119 dan 229 partikel, di mana *fragmen* dan *film* kembali mendominasi, khususnya pada 1,6 um dengan 110 *fragmen* dan 104 *film*.

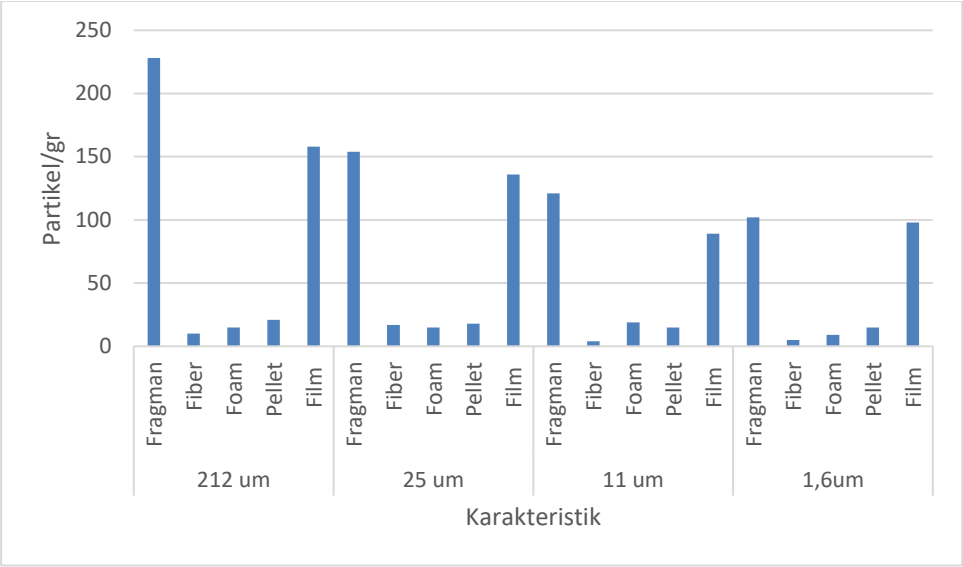
4.3.1 Identifikasi Jumlah Mikroplastik pada reaktor *Constructed wetland* 100%

Berdasarkan hasil pengujian 100% sampel tanah pada reaktor CW Bakteri, diperoleh total jumlah mikroplastik sebesar 1502 partikel dengan variasi ukuran kertas saring. Pada ukuran 212 µm, teridentifikasi mikroplastik tertinggi yaitu 571 partikel, yang didominasi oleh jenis *fragmen* (265 partikel) dan *film* (228 partikel), sementara jenis lain seperti *fiber*, *foam*, dan *pellet* jumlahnya relatif kecil. Pada ukuran 25 µm, jumlah mikroplastik yang terdeteksi mencapai 453 partikel, dengan komposisi terbesar berasal dari *fragmen* (225 partikel) dan *film* (195 partikel).

Selanjutnya, pada ukuran 11 µm ditemukan 194 partikel, dengan jenis *fragmen* (89 partikel) dan *film* (78 partikel) kembali mendominasi. Terakhir, pada ukuran 1,6 µm, jumlah mikroplastik yang teridentifikasi adalah 284 partikel, dengan *fragmen* (155 partikel) dan *film* (87 partikel) menjadi jenis terbanyak. Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa jenis fragmen dan film merupakan mikroplastik paling dominan pada setiap ukuran saringan, sedangkan *fiber, foam*, dan *pellet* hanya ditemukan dalam jumlah kecil. Temuan ini mengindikasikan bahwa proses degradasi plastik cenderung menghasilkan *fragmen* kecil dan *film* yang lebih banyak bertahan di lingkungan tanah.



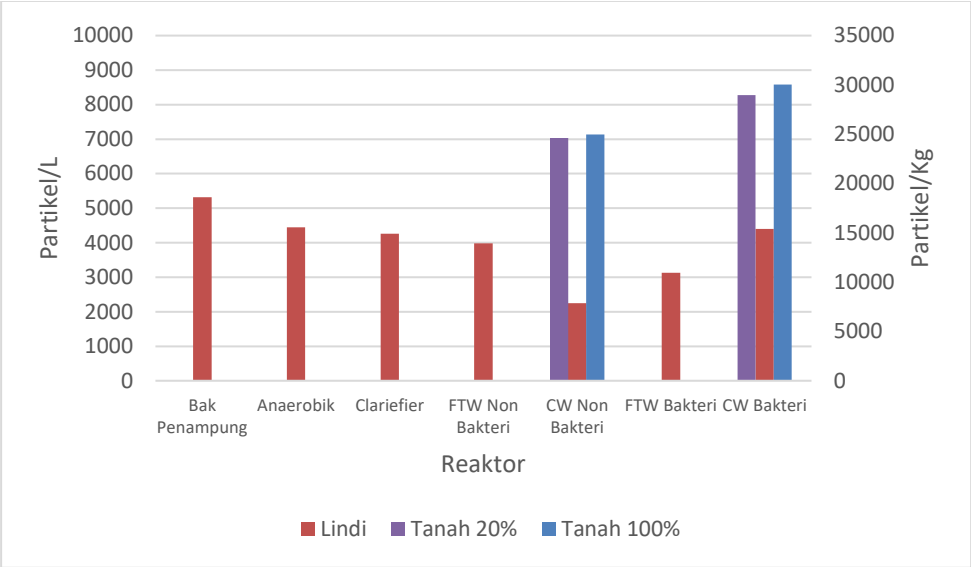
Gambar 4. 11 Jumlah Berdasarkan Karakteristik Constructed wetland bakteri 100%



Gambar 4. 12 Jumlah Berdasarkan Karakteristik Constructed wetland nonbakteri 100%

Berdasarkan hasil pengujian 100% sampel tanah pada reaktor CW Non Bakteri, diperoleh total jumlah mikroplastik sebanyak 1249 partikel. Pada ukuran kertas saring 212 µm, teridentifikasi 432 partikel, yang didominasi oleh jenis *fragmen* (228 partikel) dan *film* (158 partikel), sementara *fiber, foam*, dan *pellet* ditemukan dalam jumlah lebih kecil. Pada ukuran 25 µm, jumlah mikroplastik mencapai 340 partikel, dengan sebaran terbesar pada *fragmen* (154 partikel) dan *film* (136 partikel). Selanjutnya, pada ukuran 11 µm diperoleh 248 partikel, dengan dominasi *fragmen* (121 partikel) dan *film* (89 partikel). Terakhir, pada ukuran 1,6 µm, jumlah mikroplastik yang terdeteksi adalah 229 partikel, dengan *fragmen* (102 partikel) dan *film* (98 partikel) sebagai jenis terbanyak.

Secara keseluruhan, hasil menunjukkan bahwa jenis *fragmen* dan *film* merupakan mikroplastik dominan pada semua ukuran saringan, sedangkan *fiber*, *foam*, dan *pellet* jumlahnya relatif kecil. Jika dibandingkan dengan CW Bakteri, total mikroplastik pada CW Non Bakteri lebih rendah (1249 partikel) dibanding CW Bakteri (1502 partikel), sehingga dapat diinterpretasikan bahwa keberadaan bakteri dalam sistem CW berpotensi meningkatkan fragmentasi plastik menjadi ukuran yang lebih kecil, sehingga jumlah partikel terdeteksi lebih tinggi.



Gambar 4. 13 Jumlah total dan perbandingan Mikroplastik pada tanah dan air lindi pada *constructed wetland* 20% dan 100%

Berdasarkan hasil pengujian mikroplastik pada media tanah di reaktor CW Bakteri dan CW Non Bakteri, terlihat bahwa jumlah total mikroplastik lebih tinggi pada CW Bakteri yaitu sebanyak 28971 partikel/Kg, dibandingkan dengan CW Non Bakteri yang mencapai 24.269 partikel/Kg. Pada ukuran kertas saring 212 µm dan 25 µm, jumlah mikroplastik di CW Bakteri lebih tinggi 9800 dan 9286 partikel dibanding CW Non Bakteri 7514 dan 7171 partikel, yang menunjukkan bahwa sebagian besar mikroplastik berukuran besar seperti *fragmen* dan *film* telah terakumulasi dalam tanah sebelum proses fitoremediasi berlangsung. Sebaliknya, pada ukuran saring 11 µm, jumlah mikroplastik pada CW Non Bakteri 3400 partikel sedikit lebih tinggi dibandingkan CW Bakteri 2629 partikel, sementara pada ukuran saring 1,6 µm, jumlahnya kembali lebih tinggi di CW Bakteri 7257 berbanding 6543 partikel.

Berdasarkan hasil pengujian mikroplastik berdasarkan ukuran kertas saring, jumlah partikel yang terdeteksi pada sistem CW Bakteri lebih tinggi dibandingkan dengan CW Non Bakteri. Pada ukuran 212 µm, jumlah mikroplastik pada CW Bakteri mencapai 11.420 partikel, sedangkan pada CW Non Bakteri sebanyak 8.640 partikel. Pada ukuran 25 µm, CW Bakteri juga menunjukkan jumlah yang lebih besar yaitu 9.060 partikel, dibandingkan dengan 6.800 partikel pada CW Non Bakteri. Namun pada ukuran 11 µm, hasil yang terdeteksi justru lebih tinggi pada CW Non Bakteri yaitu 4.960 partikel, sedangkan CW Bakteri hanya 3.880 partikel.

Sementara itu, pada ukuran terkecil yaitu 1,6 µm, CW Bakteri kembali lebih tinggi dengan 5.680 partikel, dibandingkan CW Non Bakteri yang terdeteksi sebanyak 4.580 partikel. Secara keseluruhan, hasil ini memperlihatkan bahwa sistem CW Bakteri cenderung menghasilkan jumlah mikroplastik lebih banyak pada ukuran besar (212 µm dan 25 µm) maupun sangat kecil (1,6 µm), yang mengindikasikan adanya proses fragmentasi plastik oleh aktivitas bakteri sehingga menghasilkan partikel lebih banyak. Sementara itu, sistem CW Non Bakteri lebih tinggi pada ukuran 11 µm, yang menunjukkan perbedaan mekanisme akumulasi dan filtrasi mikroplastik pada sistem tanpa bakteri.

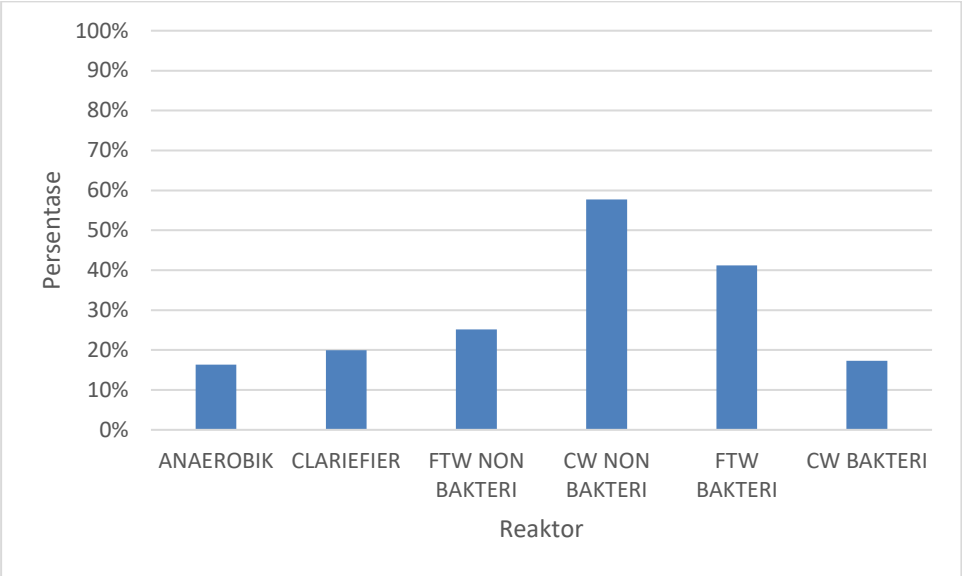
Akumulasi pada tanah CW Bakteri menunjukkan hasil yang signifikan, yaitu 28.971 partikel pada 20% sampel tanah dan meningkat hingga 30.040 partikel pada 100% sampel tanah. Akumulasi pada tanah juga tinggi, dengan hasil 24.629 partikel pada 20% sampel tanah dan meningkat hingga 24.980 partikel pada 100% sampel tanah.

Pada penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa mikroplastik telah banyak ditemukan di tanah sebelum dilakukan proses fitoremediasi menggunakan *constructed wetland*. Studi oleh Zhang et al. (2025) menunjukkan bahwa konsentrasi mikroplastik dalam tanah basah alami maupun buatan sebelum rekayasa ekosistem berkisar antara 500 hingga lebih dari 4.000 partikel/kg tanah, tergantung pada intensitas aktivitas manusia di sekitar lokasi. Identiifikasi mikroplastik pada tanah Diketahui bahwa hampir 90% dari limbah plastik di daratan akhirnya masuk ke lingkungan tanah, baik secara langsung maupun tidak langsung (Plastics Europe, E. 2019).

4.4 Efektivitas Reaktor dalam menghilangkan Mikroplastik

Berdasarkan hasil penelitian, jumlah mikroplastik yang terdeteksi pada setiap unit pengolahan menunjukkan variasi yang cukup signifikan. Pada unit awal, yaitu Bak Penampung, teridentifikasi sebanyak 532 partikel yang kemudian mengalami penurunan pada unit Anaerobik menjadi 445 partikel (16%), serta pada Clarifier menjadi 426 partikel(20%). Penurunan lebih besar terlihat pada unit FTW Bakteri dengan jumlah 313 partikel, yang menunjukkan efisiensi penghilangan sekitar 41% dibandingkan kondisi awal. Sementara itu, pada unit CW Bakteri justru masih ditemukan 440 partikel dengan efisiensi rendah (17%), sehingga kinerjanya tidak

sebaik unit lain. Sebaliknya, FTW Non Bakteri mampu menurunkan jumlah partikel menjadi 398 (25%), dan hasil terbaik ditunjukkan oleh CW Non Bakteri dengan jumlah akhir 225 partikel atau efisiensi penghilangan mencapai 58%.



Gambar 4. 14 Persentasi Removal mikroplastik

Namun demikian, terdapat peningkatan jumlah mikroplastik pada tahap CW Bakteri menjadi 440 partikel setelah sebelumnya turun hingga 313 partikel di FTW Bakteri. Kenaikan ini kemungkinan besar tidak berasal dari produksi mikroplastik baru, melainkan disebabkan oleh lepasnya mikroplastik dari media tanah CW, yang sudah mengandung kontaminan sejak sebelum proses fitoremediasi dilakukan. Zhang et al. (2023) menjelaskan bahwa tanah *wetland* secara umum telah mengandung mikroplastik dalam jumlah signifikan (antara 500–4.000 partikel/kg), tergantung pada riwayat penggunaan lahan dan tekanan aktivitas manusia sebelumnya. Hal ini diperkuat oleh Li et al. (2022), yang menemukan bahwa tanah pertanian dan lahan terbuka adalah sumber utama kontaminasi mikroplastik akibat penggunaan pupuk organik dan irigasi air limbah. Dalam konteks ini, mikroplastik yang dilepaskan dari substrat tanah CW menjadi sumber sekunder dalam pengukuran jumlah partikel setelah air melewati FTW.

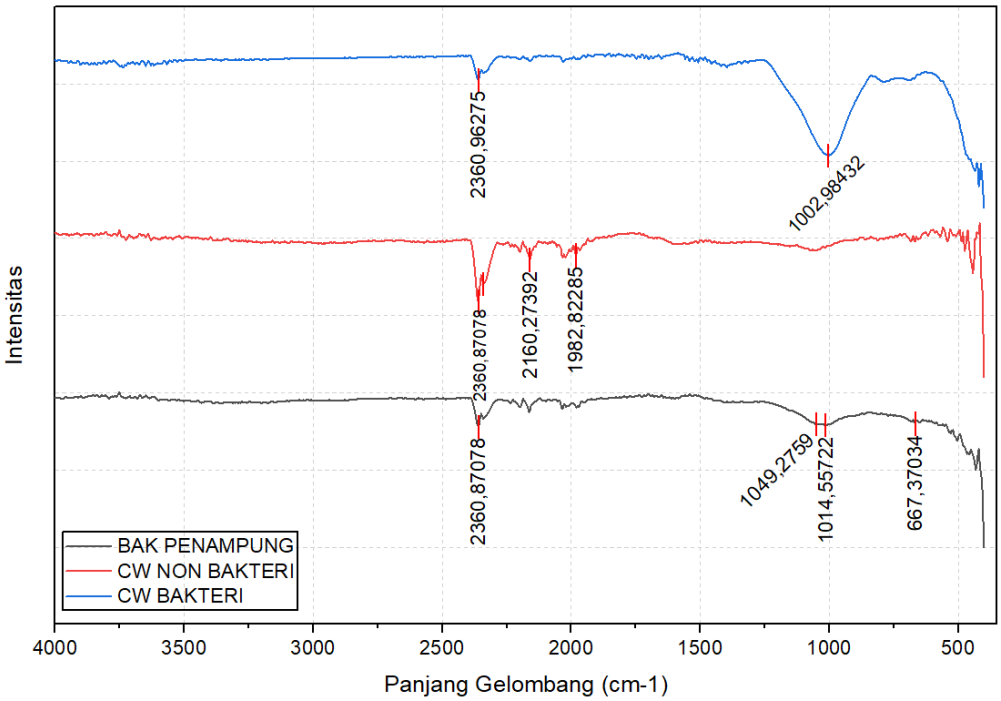
Setelah melalui CW Bakteri, aliran kembali melalui Clarifier ke jalur non-bakteri. Jumlah mikroplastik di FTW Non Bakteri kembali meningkat menjadi 398 partikel, namun mengalami penurunan yang signifikan pada CW Non Bakteri, yakni hingga 225 partikel. Penurunan ini menunjukkan bahwa CW Non Bakteri

juga tetap memiliki fungsi retensi mikroplastik yang efektif. Studi oleh Tang et al. (2024) menunjukkan bahwa sistem *constructed wetland* horizontal *subsurface flow* mampu menghilangkan hingga 82–100% mikroplastik, terutama jenis fragmen dan fiber, melalui filtrasi fisik dan adsorpsi oleh biofilm.

Secara keseluruhan, efektivitas sistem CW dalam mengurangi mikroplastik tergantung tidak hanya pada desain proses, tetapi juga pada kualitas tanah dan substrat awal yang digunakan. Peningkatan jumlah mikroplastik di CW Bakteri merupakan indikasi kuat bahwa tanah sebelum fitoremediasi sudah tercemar, dan bila tidak dilakukan pembersihan atau stabilisasi awal, dapat menjadi sumber pelepasan mikroplastik kembali ke air. Oleh karena itu, dalam perencanaan sistem CW, perlu diperhatikan tidak hanya struktur dan tanaman, tetapi juga kualitas tanah yang digunakan.

4.5 Analisis Mikroplastik dengan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR)

Analisis FTIR (*Fourier Transform Infrared Spectroscopy*) dilakukan untuk mengidentifikasi jenis gugus fungsi dan jenis polimer mikroplastik yang terkandung dalam sampel dari beberapa unit reaktor. Dari hasil spektrum yang diperoleh, ditemukan beberapa puncak (*peak*) utama yang menunjukkan keberadaan gugus fungsional spesifik, yang dapat dikaitkan langsung dengan jenis polimer umum penyusun mikroplastik.



Gambar 4. 15 Grafik Gelombang

Tabel 4. 3 Identifikasi Karakteristik *Peak* FTIR pada Mikroplastik

Reaktor	Hasil (cm^{-1})	Gugus Fungsi	Jenis Polimer	Referensi
Bak Penampung	1049,27	C–O *Streching*	*Polyethylene terephthalate* (PET)	Mecozzi.,et al 2009 , Jung et al., 2018 , East, A. J., & Rujanavech, C. (1990). S , Asensio et al., 2007 , Jung et al., 2018 , Verleye et al., 2001
	1014,56	*Aromatic* CH in	*Polycarbonate*(PC)	
	667,37	C–H *bending* (*aromatik/alkana*)	*Polyvinyl chloride* (PVC)	
	2360,87	CO_2 / C≡C / C≡N (background)	-	
CW Non Bakteri	2160,27	C–O (ester/ether), C–N (amine)	*Polyester / Poliamida*	
	1982,82	C = O Streaching	*Polycarbonate*(PC)	
	2360,87	CO_2 / C≡C / C≡N (*background*)	-	
CW Bakteri	1002,98	C - O	*Ethylene Vinyl acetate* (EVA)	
	2360,96	CO_2 / C≡C / C≡N (*background)*	-	

Pada Reaktor pertama pada pengujian FTIR Terdapat tiga *peak* dominan pada daerah 1049,27 cm^{-1}, 1014,56 cm^{-1}, dan 667,37 cm^{-1}. *Peak* pada 1049,27 cm^{-1} menunjukkan gugus C=O *stretching*, yang merupakan ciri khas dari polimer *Polyethylene terephthalate* (PET). Peak pada 1014,56 cm^{-1} diidentifikasi sebagai getaran *aromatik* CH, yang diasosiasikan dengan *Polycarbonate* (PC), sedangkan peak pada 667,37 cm^{-1} berhubungan dengan C–H *bending* yang sering ditemukan pada *Polyvinyl chloride* (PVC). Hasil ini menunjukkan bahwa sampel awal (sebelum proses pengolahan) sudah mengandung beragam jenis mikroplastik dari polimer berbasis plastik keras dan fleksibel, yang sesuai dengan berbagai sumber domestik seperti botol plastik, pipa, dan kemasan.

Pada CW Non Bakteri, teridentifikasi *peak* pada 2160,27 cm^{-1} yang mengindikasikan adanya gugus C–O (*ester/ether*) dan C–N (*amine*), yang merupakan karakteristik dari polimer *Polyester* atau *Poliamida* (*Nylon*). Selain itu, peak pada 1982,82 cm^{-1} menunjukkan C=O *stretching* dari *Polycarbonate* (PC). Keberadaan kedua jenis polimer ini menandakan bahwa meskipun proses filtrasi

telah terjadi, mikroplastik berjenis teknik (*engineering plastics*) masih lolos, atau bahkan mungkin dilepaskan kembali dari substrat tanah. Hal ini sejalan dengan penelitian oleh Mecozzi et al. (2009) dan Jung et al. (2018), yang menyatakan bahwa mikroplastik dari tanah pertanian atau sedimen wetland sering mengandung polimer dengan gugus ester dan amina.

Spektrum FTIR pada CW Bakteri menunjukkan *peak* utama pada 1002,98 cm^{-1} yang diidentifikasi sebagai gugus C–O, yang sesuai dengan polimer *Ethylene Vinyl Acetate* (EVA). Polimer ini umum ditemukan dalam busa sepatu, sol sandal, dan lapisan kemasan. Keberadaan EVA menunjukkan potensi kontaminasi dari limbah rumah tangga atau pemakaian plastik fleksibel. Selain itu, adanya *peak* latar belakang pada 2360,96 cm^{-1} (CO_2 / C≡C / C≡N) menunjukkan bahwa masih terdapat interferensi atau kontaminan dalam bentuk senyawa karbonik. Menariknya, peak yang teridentifikasi pada CW Bakteri berbeda dengan CW Non Bakteri, mengindikasikan bahwa komposisi mikroplastik yang dilepaskan atau tersisa pada kedua sistem ini dipengaruhi oleh karakteristik tanah dan kemungkinan pelepasan kembali polimer dari substrat.

BAB V
PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian serta analisis data yang dilakukan, didapatkan Kesimpulan- kesimpulan antara lain sebagai berikut:

1. Jumlah mikroplastik yang terdeteksi pada setiap unit pengolahan menunjukkan variasi yang cukup signifikan. Pada unit awal, yaitu Bak Penampung, teridentifikasi sebanyak 532 partikel yang kemudian mengalami penurunan pada unit Anaerobik menjadi 445 partikel (16%), serta pada Clarifier menjadi 426 partikel(20%). Penurunan lebih besar terlihat pada unit FTW Bakteri dengan jumlah 313 partikel, yang menunjukkan efisiensi penghilangan sekitar 41% dibandingkan kondisi awal. Sementara itu, pada unit CW Bakteri justru masih ditemukan 440 partikel dengan efisiensi rendah (17%), sehingga kinerjanya tidak sebaik unit lain. Sebaliknya, FTW Non Bakteri mampu menurunkan jumlah partikel menjadi 398 (25%), dan hasil terbaik ditunjukkan oleh CW Non Bakteri dengan jumlah akhir 225 partikel atau efisiensi penghilangan mencapai 58%.Kenaikan ini tidak berasal dari produksi mikroplastik baru, melainkan disebabkan oleh lepasnya mikroplastik dari media tanah CW, yang sudah mengandung kontaminan sejak sebelum proses fitoremediasi dilakukan.
2. Mikroplastik yang telah diidentifikasi dengan menggunakan mikroskop, Jenis mikroplastik yang ditemukan berupa *fragmen, fiber, film, foam*, dan *pellet*.bentuk yang paling dominan yaitu *Fragment* berjumlah 1335 partikel dan *film* 1140 partikel sedangkan jenis mikroplastik paling sedikit yaitu tingkat pertama yaitu jenis *foam* berjumlah 55 partikel kedua yaitu *fiber* berjumlah 121 partikel dan yang ketiga yaitu *pellet* berjumlah 128 partikel. Pada mikroplastik identifikasi jenis polimer yaitu PET,PC,PVC,*Polyester,*EVA.

5.2 Saran

1. Perlu dilakukan pengujian pada tanah secara menyeluruh sebelum menggunakan reaktor *Constructed wetland* agar maksimal untuk melihat kelimpahan pada mikroplastik air lindi pada reaktor *constructed wetland*.
2. Kualitas instrumen identifikasi polimer mikroplastik memiliki peran penting dalam penelitian ini.perlu peningkatan pada alat yang digunakan.

DAFTAR PUSTAKA

Adila, I. S. (2021). ANALISIS KANDUGAN MIKROPLASTIK PADA SEDIMEN PANTAI SUKARAJA KOTA BANDAR LAMPUNG. Fakultas Tarbiyah Dan Keguruan Universitas Islam Negeri Raden Intan Lampung.

Ambasari, D. A., & Anggiani, M. (2022). KAJIAN KELIMPAHAN MIKROPLASTIK PADA SEDIMEN DI WILAYAH PERAIRAN LAUT INDONESIA Diah Ayu Ambarsari 1* dan Milani Anggiani 2. 47, 20–28.

Backman. P. A., & Sikora, R. A. (2008). Endophytes: An emerging tool fobiological control. Biological Control. 46(1). 1–3.

Basri, S. K., Badrun, A., Nur, R., Ririn, P., Susilowati., I Made, B M., Surahma, A, M., Dimas, A, P., I Wayan, S., Nur, A, S., Alvendo,W, A., Ratna, D, P, (2020). Mikroplastik di Lingkungan. Media Sains Indonesia.

Cahyana, G. H., & Aulia, A. N. (2019). Pengolahan Air Limbah Rumah Sakit Menggunakan Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetland. EnviroSan, 2(2).

Dewi, Y.S. dan Rahmawati, A. 2015. Efektivitas Tanaman Teratai (Nymphaea sp.) dalam Menguraikan Limbah Cair Domestik Berdasarkan Lama Waktu Perlakuan. Jurnal Ilmiah Universitas Satya Negara Indonesia. Vol 8 No 2 Desember 2015. Hal: 42-47.

Dewi, R., Pratama, H., & Sari, N. (2023). "Pengaruh Bioaugmentasi dalam Pengolahan Limbah Cair Industri". *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 20(2), 75-83.

Ding, L., Mao, R. fan, Guo, X., Yang, X., Zhang, Q., & Yang, C. (2019). Microplastics In Surface Waters and Sediments Of The Wei River, In The Northwest of China. Science of the Total Environment, 667, 427-434.http://digilib.uinsa.ac.id/63781/2/Sheril%20Andrina%20Putri_H0521 9016.pdf

Dzakwan, M. A., & Ni'am, A. C. (2018). Kajian Jenis Tanaman Rumput untuk Teknologi Fitoremediasi Tanah Tercemar Logam Berat. "Introductory Chapter: Introducing Heavy Metals",in Heavy Metals, 413-421.

Enfrin et al. (2019). *Membrane-based filtration and microplastics transport.*

Fajariyah, C. dan Mangkoedihardjo, S. 2017. Kajian Literatur Pengolahan Lindi Tempat Pemrosesan Akhir Sampah dengan Teknik Lahan Basah menggunakan Tumbuhan Air. Jurnal Teknik ITS. Vol 6 No 2. Hal: D-190-D195.

Ferez-Munuzuri, V. Size-Dependent Microplastic Fragmentation Model. J. Mar. Sci. Eng. 2024, 12, 1213. https://doi.org/ 10.3390/jmse12071213

Gewert, B., Plassmann, M. M., & MacLeod, M. (2015). Pathways for degradation of plastic polymers floating in the marine environment. *Environmental Science: Processes & Impacts, 17*(9), 1513–1521.

Hariyanto. (2014). Pengelolaan Sampah Di Kota Semarang Untuk Menuju Kota Bersih. Jurnal geografi, 11(2): 237-246. https://doi.org/10.15294/jg.v11i2.8031

Hasbi, M. K. (2023). Kedai Kopi Menjamur, Sampah Plastik Makin Menumpuk di Yogyakarta. MONGABAY Situs Berita Lingkungan.

He, P., Chen, L., Shao, L., Zhang, H., Lü., F., (2019). Municipal solid waste (MSW) landfill: A Source of Microplastics? -Evidence of Microplastics in Landfill Leachate. Water Research, 159, 38-45. https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.04.060

Hidayati, N. 2005. Fitoremediasi dan Potensi Tumbuhan Fitoakumulator. Jurnal Hayati. Vol 12 No 1. Hal: 35-40.

Hiwari, H., Purba, N. P., Ihsan, Y. N., Yuliadi, L. P. S., & Mulyani, P. G. (2019). Kondisi sampah mikroplastik di permukaan air laut sekitar Kupang dan Rote , Provinsi Nusa Tenggara Timur Condition of microplastic garbage in sea surface water at around Kupang and Rote , East Nusa Tenggara Province. 5 , 165 171.

Isnugroho, R., Prasetyo, D., & Fadhilah, N. (2023). Isolasi dan identifikasi bakteri pendegradasi mikroplastik dari TPA. *Jurnal Sains Lingkungan, 15*(1), 45–56.

Jung, M., et al. (2018). *Identification of microplastics using FTIR and NIR spectroscopy*.

Kandel, S., Joubert, P., & Doty, S. (2017). Bacterial Endophyte Colonization and Distribution withinPlants. Microorganisms. 5(4): 77.

Kartika, Yetty, N. H., Budi, T. P., & Djuhriah, N. (2017). Perbedaan Waktu Tinggal Tanaman Cattail (Typha angustifolia) terhadap Penurunan Kadar COD Air Limbah Domestik Kantin. Jurnal Riset Kesehatan Poltekkes Depkes Bandung, 11(1), 196–201.

Kadlec, R. H., & Wallace, S. D. (2009). *Treatment Wetlands*. CRC Press.

Lares M, Ncibi MC, Sillanpää M, Sillanpää M (2018) Occurrence, identi fication and removal of microplastic particles and fibers in conven tional activated

sludge process and advanced MBR technology. Water Res 133:236–246. https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.01.049

Leslie, H. A., et al. (2022). Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood. *Environment International*, 163, 107199.

Li, J., Liu, H., & Paul Chen, J. (2022). Microplastics in freshwater systems: A review on occurrence, environmental effects, and methods for microplastics detection. Science of the Total Environment, 834, 155275.

Lusher, A. L., Tirelli, V., O'Conner, I., Officer, R. (2015). Microplastics in Arctic polar waters: The First reported values of particles in surface and sub-surface samples. Scientific Reports. 5(1): 1-9. https://doi.org/10.1038/srep14947.

.

Machdar, I. 2008. Dasar-Dasar Sintesis Proses. Penerbit Universitas Syiah Kuala Banda Aceh.

M. Eriksen , C. Laurent , S. Henry, M. Thiel, C. Moore, J. Borerro, F. Galgani, P. Ryan dan J. Reisser, "Plastic Pollution in the World's Oceans: More Than 5 Trillion Plastic Pieces Weighing Over 250,000 Tons Afloat at Sea," PLoS One, vol. 9 (12), no. 111913, 2014. https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0111913

Patil, S., & Chakraborty, S. (2016). Effects of Step-Feeding and Intermittent Aeration on Organics and Nitrogen Removal in A Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetland. Journal of Environmental Science and Health -Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering, 52(4). https://doi.org/10.1080/10934529.2016.1262608

Ramadhani, J., Asrifah, R. D., & Wahyuning, I. (2019). Pengolahan Air Lindi Menggunakan Metode Constructed Wetland di TPA Sampah Tanjungrejo, Desa Tanjungrejo, Kecamatan Jekulo, Kabupaten Kudus. Jurnal Ilmiah Lingkungan Kebumian, 1(2), 1–8. http://jurnal.upnyk.ac.id/index.php/kebumian/article/view/3280

Rillig, M. C. (2012). Microplastic in Terrestrial Ecosystems and the Soil? Environ.Sci. Technol, 46(12): 6453-6454. https://doi.org/10.1021/es302011r.

Ryan, R. P., Germaine, K., Franks, A., Ryan, D. J., & Dowling, D. N. 2008. Bacterial endophytes: recent developments and applications. FEMS microbiology letters. 278(1): 1-9.

Safitri, R. 2009. Phytoremediasi Greywater dengan Tanaman Kayu Apu (Pistia stratiotes) dan Tanaman Kiambang (Salvinia molesta) serta Pemanfaatannya untuk Tanaman Selada (Lactuca sativa) secara Hidroponik. Skripsi Program Studi Ilmu Tanah Fakultas Pertanian IPB. Bogor.

Sari, N., & Pratama, H. (2021). "Aplikasi Bioaugmentasi untuk Pengolahan Air Limbah Domestik". *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 19(2), 87-95.

Setyorini, A., Lestari, N., & Nugraha, R. (2021). Potensi bakteri dalam mendegradasi plastik polietilen dari lingkungan perairan. *Biosains Medika, 9*(2), 123–130.

Sutrisno, T., & Wibowo, D. (2020). "Pemanfaatan Bakteri Indigenous dalam Bioremediasi Limbah Cair Industri Tekstil". *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 21(3), 45-53.

Sun, M., Liu, J., & Zhang, Q. (2023). *Microplastics in wastewater treatment plants: Fate, removal mechanisms, and perspectives.* Water Science and Technology, 87(3), 685–701. https://doi.org/10.2166/wst.2023.127

Soemirat, J.1996. Kesehatan Lingkungan. Gadjah Mada University Press.Yogyakarta.

Stewart, F. M., Mulholland, T., Cunningham, A. B., Kania, B. G., & Osterlund, M. T. 2008. Floating islands as an alternative to constructed wetlands for treatment of excess nutrients from agricultural and municipal wastes - Results of laboratory-scale tests. Land Contamination and Reclamation. 16(1), 25–33.

Sugandi, D., Agustiawan, D., Febriyanti, S. V., Yudi, Y., & Wahyuni, N. (2021). Identifikasi Jenis Mikroplastik dan Logam Berat di Air Sungai Kapuas Kota Pontianak. Positron , 11 (2), 112.

Susilowati, D.N., N. Hidayatun, Tasliah, & K. Mulya. 2010. Keragaman Bakteri Endofitik Diisolasi dari empat Varietas Padi dengan Metode ARDRA. Berita Biologi. 10(2):241-248.

S., Asensio et al. (2007). *Polymers in soil and sediment: a review of detection methods*.

Usman, S. dan Santosa, I. 2014. Pengolahan Air Limbah Sampah (Lindi) dari Tempat Pembuangan Akhir Sampah (TPA) Menggunakan Metoda Constructed Wetland. Jurnal Kesehatan. Vol V No 2. Hal: 98-108.

Veronika, A. (2017). Kontaminasi Mikroplastik di Perairan Tawar. Bandung: ITB

Victoria, A. V. (2017). Kontaminasi Mikroplastik di Perairan Tawar. Teknik Kimia ITB, January, 1–10.

Wang, C., Zhao, J., & Xing, B. (2021). Environmental source, fate, and toxicity of microplastics. In Journal of Hazardous Materials (Vol.407). https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124357

Wang, Y., et al. (2021). Health risks of microplastics: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 207, 111264.

Wei, R., & Zimmermann, W. (2017). Microbial enzymes for the recycling of recalcitrant petroleum-based plastics: How far are we? *Microbial Biotechnology, 10*(6), 1308–1322.

Wu, S., Wallace, S., Brix, H., Kuschk, P., Kirui, W. K., Masi, F., & Dong, R. (2014). Treatment of industrial effluents in constructed wetlands: challenges, operational strategies and overall performance. *Environmental Pollution*, 192, 245–262.

Yazid, M. 2014. Peranan Isolat Bakteri Indigenous Sebagai Agen Bioremediasi Perairan Yang Terkontaminasi Uranium. Jurnal Iptek Nuklir Genendra. 17(1): 35-44

Ziajahromi et al. (2017). *Wastewater treatment plants as microplastic pathways*.

Zhang, H., Li, Y., & Zhao, Y. (2023). *Microplastic contamination in soil of constructed wetlands: Sources, distribution, and ecological implications.* Water, 15(2), 231. https://www.mdpi.com/2073-4441/15/2/231

Zhao, Y., Collum, S., Phelan, M., Goodwill, J., & Wang, Q. (2016). Nitrogen removal in constructed wetlands using different design configurations: a review. *Journal of Environmental Management*, 166, 88–96.

Zurub R., et al. (2024) . Microplastics Exposure: Implications for Human Fertility, Pregnancy and Child Health. University of Ottawa, Ottawa, ON, Canada. 10.3389/fendo.2023.1330396

LAMPIRAN

Lampiran 1

Hasil perhitungan Mikroplastik pada air lindi dengan kertas saring 212 um

PENGUJIAN 20% SAMPEL				
REAKTOR	**UKURAN KERTAS SARING**	**JENIS MIKROPLASTIK**	**JUMLAH MIKROPLASTIK**	**Total**
STORAGE TANK	212um	Fragman	130	346
		Fiber	22	
		Foam	22	
		Pellet	30	
		Film	142	
ANAEROBIC		Fragman	152	278
		Fiber	8	
		Foam	5	
		Pellet	15	
		Film	98	
CLARIEFIER		Fragman	141	289
		Fiber	15	
		Foam	2	
		Pellet	12	
		Film	119	
FTW NON BACTERIA		Fragman	109	233
		Fiber	3	
		Foam	1	
		Pellet	3	
		Film	117	
CW NON BACTERIA		Fragman	69	138
		Fiber	1	
		Foam	2	
		Pellet	3	
		Film	63	
FTW BACTERIA		Fragman	95	156
		Fiber	8	
		Foam	1	
		Pellet	4	
		Film	48	
CW BACTERIA		Fragman	197	367
		Fiber	5	
		Foam	7	
		Pellet	13	
		Film	145	
JUMLAH KELIMPAHAN				1807

Lampiran 2

Hasil perhitungan Mikroplastik pada air lindi dengan kertas saring 25 um

PENGUJIAN 20% SAMPEL				
REAKTOR	**UKURAN KERTAS SARING**	**JENIS MIKROPLASTIK**	**JUMLAH MIKROPLASTIK**	Total
STORAGE TANK	25um	Fragman	40	107
		Fiber	9	
		Foam	6	
		Pellet	10	
		Film	42	
ANAEROBIC		Fragman	40	88
		Fiber	10	
		Foam	0	
		Pellet	1	
		Film	37	
CLARIEFIER		Fragman	27	55
		Fiber	3	
		Foam	0	
		Pellet	7	
		Film	18	
FTW NON BACTERIA		Fragman	47	82
		Fiber	2	
		Foam	1	
		Pellet	4	
		Film	28	
CW NON BACTERIA		Fragman	16	40
		Fiber	4	
		Foam	0	
		Pellet	1	
		Film	19	
FTW BACTERIA		Fragman	45	83
		Fiber	5	
		Foam	1	
		Pellet	2	
		Film	30	
CW BACTERIA		Fragman	11	33
		Fiber	4	
		Foam	0	
		Pellet	0	
		Film	18	
JUMLAH KELIMPAHAN				488

Lampiran 3

Hasil perhitungan Mikroplastik pada air lindi dengan kertas saring 11 um

PENGUJIAN 20% SAMPEL				
REAKTOR	**UKURAN KERTAS SARING**	**JENIS MIKROPLASTIK**	**JUMLAH MIKROPLASTIK**	Total
STORAGE TANK	11um	Fragman	15	41
		Fiber	3	
		Foam	0	
		Pellet	2	
		Film	21	
ANAEROBIC		Fragman	19	40
		Fiber	0	
		Foam	0	
		Pellet	1	
		Film	20	
CLARIEFIER		Fragman	13	37
		Fiber	0	
		Foam	0	
		Pellet	6	
		Film	18	
FTW NON BACTERIA		Fragman	15	35
		Fiber	0	
		Foam	0	
		Pellet	0	
		Film	20	
CW NON BACTERIA		Fragman	11	20
		Fiber	1	
		Foam	0	
		Pellet	0	
		Film	8	
FTW BACTERIA		Fragman	25	36
		Fiber	0	
		Foam	0	
		Pellet	0	
		Film	11	
CW BACTERIA		Fragman	11	17
		Fiber	0	
		Foam	0	
		Pellet	0	
		Film	6	
JUMLAH KELIMPAHAN				226

Lampiran 4

Hasil perhitungan Mikroplastik pada air lindi dengan kertas saring 1,6 um

PENGUJIAN 20% SAMPEL				
REAKTOR	**UKURAN KERTAS SARING**	**JENIS MIKROPLASTIK**	**JUMLAH MIKROPLASTIK**	Total
STORAGE TANK	1,6um	Fragman	11	38
		Fiber	6	
		Foam	1	
		Pellet	2	
		Film	18	
ANAEROBIC		Fragman	18	39
		Fiber	2	
		Foam	2	
		Pellet	0	
		Film	17	
CLARIEFIER		Fragman	22	45
		Fiber	3	
		Foam	0	
		Pellet	5	
		Film	15	
FTW NON BACTERIA		Fragman	19	48
		Fiber	1	
		Foam	2	
		Pellet	3	
		Film	23	
CW NON BACTERIA		Fragman	11	27
		Fiber	0	
		Foam	2	
		Pellet	3	
		Film	11	
FTW BACTERIA		Fragman	16	38
		Fiber	5	
		Foam	0	
		Pellet	0	
		Film	17	
CW BACTERIA		Fragman	10	23
		Fiber	1	
		Foam	0	
		Pellet	1	
		Film	11	
JUMLAH KELIMPAHAN				258

Lampiran 5

Hasil persentase removal mikroplastik pada reaktor

$Rumus\ \frac{Influent-Effluent}{Influent} = \%$

REAKTOR	REMOVAL
ANAEROBIK	16%
CLARIEFIER	4%
FTW BAKTERI	27%
CW BAKTERI	-41%
FTW NON BAKTERI	7%
CW NON BAKTERI	43%

BAK PENAMPUNG	532
CLARIEFIER	445
FTW BAKTERI	426
CW BAKTERI	313
FTW NON BAKTERI	440
CW NON BAKTERI	398
CW NON BACTERIA	225

$$\frac{Bak\ penampung - Anaerobik}{Bak\ penampung} = \frac{532-445}{532} = 16\%$$

$$\frac{Bak\ Penampung - Clariefier}{Bak\ Penampung} = \frac{532-426}{532} = 20\%$$

$$\frac{Bak\ Penampung - FTW\ B}{Bak\ Penampung} = \frac{532-313}{532} = 41\%$$

$$\frac{Bak\ Penampung - CW\ B}{Bak\ Penampung} = \frac{532-440}{532} = 17\%$$

$$\frac{Bak\ Penampung - FTW\ NB}{Bak\ Penampung} = \frac{532-398}{532} = 25\%$$

$$\frac{Bak\ Penampung - CW\ NB}{Bak\ Penampung} = \frac{398-225}{313} = 58\%$$

Lampiran 6

Hasil perhitungan Mikroplastik pada tanah *constructed wetland* bakteri 20%

PENGUJIAN 20% SAMPEL TANAH					
REAKTOR	**UKURAN KERTAS SARING**	**JENIS MIKROPLASTIK**	**JUMLAH MIKROPLASTIK**	TOTAL	
CW BAKTERI	212 um	Fragman	170	343	1014/35gr
		Fiber	6		
		Foam	8		
		Pellet	9		
		Film	150		
	25 um	Fragman	160	325	
		Fiber	10		
		Foam	6		
		Pellet	4		
		Film	145		
	11 um	Fragman	54	92	
		Fiber	0		
		Foam	1		
		Pellet	3		
		Film	34		
	1,6um	Fragman	122	254	
		Fiber	16		
		Foam	13		
		Pellet	6		
		Film	97		

Lampiran 7

Hasil perhitungan Mikroplastik pada tanah *constructed wetland* nonbakteri 20%

PENGUJIAN 20% SAMPEL TANAH					
REAKTOR	**UKURAN KERTAS SARING**	**JENIS MIKROPLASTIK**	**JUMLAH MIKROPLASTIK**	TOTAL	
CW NON BAKTERI	212 um	Fragman	123	263	862/35gr
		Fiber	13		
		Foam	8		
		Pellet	11		
		Film	108		
	25 um	Fragman	128	251	
		Fiber	22		
		Foam	6		
		Pellet	3		
		Film	92		
	11 um	Fragman	66	119	
		Fiber	0		
		Foam	4		
		Pellet	3		
		Film	46		
	1,6um	Fragman	110	229	
		Fiber	4		
		Foam	6		
		Pellet	5		
		Film	104		

Lampiran 8

Hasil perhitungan Mikroplastik pada tanah *constructed wetland* bakteri 100%

PENGUJIAN 100% SAMPEL TANAH					
REAKTOR	**UKURAN KERTAS SARING**	**JENIS MIKROPLASTIK**	**JUMLAH MIKROPLASTIK**	TOTAL	
CW BACTERIA	212 um	Fragman	265	571	1502/50gr
		Fiber	13		
		Foam	28		
		Pellet	37		
		Film	228		
	25 um	Fragman	225	453	
		Fiber	8		
		Foam	11		
		Pellet	14		
		Film	195		
	11 um	Fragman	89	194	
		Fiber	3		
		Foam	9		
		Pellet	15		
		Film	78		
	1,6um	Fragman	155	284	
		Fiber	9		
		Foam	15		
		Pellet	18		
		Film	87		

Lampiran 9

Hasil perhitungan Mikroplastik pada tanah *constructed wetland* non bakteri 100%

PENGUJIAN 100% SAMPEL TANAH					
REAKTOR	**UKURAN KERTAS SARING**	**JENIS MIKROPLASTIK**	**JUMLAH MIKROPLASTIK**	TOTAL	
CW NON BACTERIA	212 um	Fragman	228	432	1249/50gr
		Fiber	10		
		Foam	15		
		Pellet	21		
		Film	158		
	25 um	Fragman	154	340	
		Fiber	17		
		Foam	15		
		Pellet	18		
		Film	136		
	11 um	Fragman	121	248	
		Fiber	4		
		Foam	19		
		Pellet	15		
		Film	89		
	1,6um	Fragman	102	229	
		Fiber	5		
		Foam	9		
		Pellet	15		
		Film	98		

Lampiran 10

Lokasi Pengambilan sampel





Lampiran 11

Rangkaian Reaktor







RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama Fathur Rachman Lahir di Selatpanjang Kabupaten Kepulauan Meranti,Riau,23 Agustus 2003.Penulis merupakan anak kedua dari tiga bersaudara dari pasangan Iwan Afrizal dan Maryanti.Penulis mengawali pendidikan yaitu dari TK Al-quran Al-Aisyah selama 1 tahun (2009),SD Negeri 03 pada tahun (2009-2015),MTsN Selatpanjang (2015-2018),SMA Negeri 1 Tebing Tinggi (2019-2021) dan telah menduduki masa menjadi Mahasiswa Program studi Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia (2021-2025).

Penulis pernah mengikuti kegiatan kemahasiswaan disaat menjadi mahasiswa S-1 Teknik Lingkungan FTSP UII,yaitu:

1. Kepanitiaan Kegiatan kemahasiswaan ditingkat universitas ,Fakultas dan Program studi.
2. Fungsionaris Himpunan Mahasiswa Teknik Lingkungan (HMTL) Periode 2021-2022.
3. Ketua Himpunan Mahasiswa Teknik Lingkungan (HMTL) Periode 2022-2023.
4. Ketua Komisi 1 Dewan Perwakilan Mahasiswa Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia 2023-2024.