



## Analisis Sistem Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) di Industri Otomotif: Studi Literatur

Wira Satya Nugraha Wicaksono

Fakultas Kesehatan Masyarakat, Universitas Airlangga, Surabaya, Indonesia 60115.

Email Korespondensi: [wira.satya.nugraha-2022@fkm.unair.ac.id](mailto:wira.satya.nugraha-2022@fkm.unair.ac.id)

### Abstrak

Setiap hari PT.X menghasilkan ratusan liter limbah cair dari proses produksi dan berpotensi mengancam kestabilan ekosistem, khususnya badan air di sekitar perusahaan. Limbah cair tersebut dikontaminasi oleh tumpahan spray booth yaitu campuran air dengan katalis TEDAL-33 dan debris headliner dari water jet berupa bahan polypropylene (PP), Low Density Polyethylene (LDPE), polyethylene terephthalate (PET), dan glass fiber. Penelitian ini mengisi celah studi sebelumnya yang belum mengkaji integrasi pengendalian mikroplastik dalam sistem IPAL industri otomotif dengan diadakan analisis alat dalam sistem Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) yang digunakan serta air effluent yang dikeluarkan dari sistem IPAL sesuai standar baku mutu Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No.5 Tahun 2014 Lampiran XLVII. Penulis menggunakan metode analisis deskriptif untuk mengobservasi secara langsung proses pengolahan air limbah dan studi literatur untuk mengimplikasikan 5 data sekunder dengan 25 artikel riset yang relevan. Hal ini dilakukan agar penulis mampu mengidentifikasi kekurangan dan akar permasalahan lingkungan yang timbul dari air limbah. Dalam artikel ini ditemukan bahwa air effluent yang dihasilkan oleh sistem IPAL PT.X sesuai dengan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No.5 Tahun 2014 Lampiran XLVII, dengan 31 parameter memenuhi golongan I dan 2 parameter masuk golongan II, yaitu Chemical Oxygen Demand (COD) dan Biological Oxygen Demand (BOD). Namun ada hal teknis yang bisa dibenahi agar mampu mencapai pemanfaatan sistem IPAL yang lebih maksimal dan air limbah yang lebih bersih dari kontaminasi fisik, kimia dan mikrobiologis.

**Kata kunci:** Sistem Instalasi Pengolahan; Air Limbah; Air Effluent.

## Analysis of Wastewater Treatment System Installation in the Automotive Industry: A Literature Review

### Abstract

Every day PT. X generates hundreds of liters of liquid waste from the production process and has the potential to threaten the stability of the ecosystem, especially the water bodies around the company. The liquid waste was contaminated by a spray booth spill, which was a mixture of water with a TEDAL-33 catalyst and headliner debris from the water jet in the form of polypropylene (PP), Low Density Polyethylene (LDPE), polyethylene terephthalate (PET), and glass fiber. This study fills the gap in the previous study that has not examined the integration of microplastic control in the automotive industry WWTP system so that it is necessary through analyzing the equipment in the Wastewater Treatment Plant (WWTP) system used as well as the effluent water discharged from the WWTP system according to the quality standard standards of the Regulation of the Minister of Environment No.5 of 2014 Appendix XLVII. The author uses a descriptive analysis method to directly observe the wastewater treatment process and a literature study to implicate 5 secondary data with 25 relevant research articles. This is done so that the author is able to identify the shortcomings and roots of environmental problems arising from wastewater. In this article, it was found that the effluent water produced by the PT. X is in accordance with the Regulation of the Minister of Environment No.5 of 2014 Appendix XLVII, with 31 parameters meeting group I and 2 parameters in group II, namely Chemical Oxygen Demand (COD) and Biological Oxygen Demand (BOD). However, there are technical things that can be improved in order to be able to achieve a more optimal utilization of the WWTP system and wastewater that is cleaner from physical, chemical and microbiological contamination.

**Keywords:** Treatment System Installation; Wastewater; Effluent Water.

**How to Cite:** Wicaksono, W. S. N. (2025). Analisis Sistem Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) di Industri Otomotif: Studi Literatur. *Empiricism Journal*, 6(3), 1010–1022. <https://doi.org/10.36312/ej.v6i3.3271>



<https://doi.org/10.36312/ej.v6i3.3271>

Copyright© 2025, Wicaksono

This is an open-access article under the [CC-BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) License.



## PENDAHULUAN

Industri otomotif merupakan salah satu sektor strategis yang menopang pertumbuhan ekonomi di Indonesia. Dalam kurun waktu empat dekade, PT. X telah berkembang menjadi salah satu pemain utama industri otomotif nasional sebagai perusahaan Original Equipment Manufacturer (OEM) yang memproduksi berbagai komponen kendaraan, khususnya

headliner mobil. Perusahaan ini memproduksi sekitar 2.400 hingga 2.800 unit headliner setiap hari dengan takt time produksi 72 detik per unit, menjadikannya produsen dengan skala besar dan tingkat efisiensi tinggi. Namun, di balik capaian tersebut, proses produksi headliner di PT. X turut menghasilkan limbah cair industri yang signifikan dan berpotensi mencemari lingkungan, terutama badan air di sekitarnya.

Salah satu sumber limbah utama berasal dari proses spray booth dan water jet, yang menggunakan air tanah dalam sebagai media utama. Berdasarkan data internal, perusahaan memanfaatkan air tanah dalam sebesar 2.131 m<sup>3</sup> pada Mei 2025, dengan rata-rata 1.901,4 m<sup>3</sup> per bulan sepanjang tahun yang sama. Dari total tersebut, sekitar 10% digunakan dalam proses produksi headliner. Air hasil dari proses spray booth, yang bercampur dengan katalis TEDA-L33 dan bahan kimia lainnya, serta air dari proses water jet yang membawa partikel limbah seperti polypropylene (PP), polyethylene terephthalate (PET), Low Density Polyethylene (LDPE), dan glass fiber, menjadi media potensial bagi kontaminasi mikroplastik dan bahan kimia berbahaya ke lingkungan. Kontaminan ini secara langsung dapat meningkatkan beban polusi kimia dan biologi pada air limbah.

Sebagai bentuk tanggung jawab lingkungan, PT. X telah membangun Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) untuk mengolah air limbah dari proses produksi menjadi air buangan terkendali (effluent). Sistem IPAL tersebut dirancang mengikuti struktur pengolahan bertahap yang meliputi pra-perlakuan (pre-treatment), pengolahan primer, sekunder, dan tersier, dengan tujuan untuk memenuhi standar baku mutu air limbah yang telah ditetapkan dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia No. 5 Tahun 2014, Lampiran XLVII. Dalam implementasinya, sistem ini telah menunjukkan efektivitas dalam mengolah sebagian besar kontaminan dari air limbah, termasuk senyawa anorganik dan mikroorganisme. Namun demikian, masih terdapat dua parameter yang belum sepenuhnya memenuhi golongan I dalam klasifikasi effluent, yakni Chemical Oxygen Demand (COD) dan Biological Oxygen Demand (BOD).

Isu utama yang belum sepenuhnya ditangani dalam sistem IPAL PT. X adalah keberadaan mikroplastik dan nanoplastik dalam limbah cair industri. Meskipun sistem IPAL telah didesain untuk menangani berbagai jenis kontaminan, penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa partikel mikroplastik berukuran sangat kecil (<100 µm) memiliki peluang tinggi untuk lolos dari proses pengolahan konvensional, terutama bila sistem tidak dilengkapi dengan teknologi filtrasi lanjutan seperti membran atau sistem granular activated carbon (Kwon et al., 2022; Michielssen et al., 2016; Park et al., 2020). Hal ini menjadi semakin penting mengingat karakteristik fisikokimia mikroplastik yang memungkinkan mereka menyerap dan mengikat polutan berbahaya lainnya, seperti logam berat dan senyawa organik, yang pada akhirnya dapat memperburuk potensi toksisitas air limbah (Wang et al., 2021; Mao et al., 2022).

Studi yang dilakukan oleh Peng et al. (2017) dan Xu et al. (2020) menyoroti bahwa efektivitas sistem IPAL dalam menghilangkan mikroplastik sangat bergantung pada jenis teknologi yang diterapkan, kualitas operasional, serta karakteristik fisik dari partikel plastik itu sendiri, termasuk ukuran, bentuk, dan densitas. Sementara beberapa fasilitas pengolahan air limbah telah menunjukkan efisiensi penghilangan mikroplastik hingga 98% melalui kombinasi flokulasi, sedimentasi, dan filtrasi, banyak juga yang melaporkan keberadaan partikel mikroplastik dalam effluent akibat agregasi dengan lumpur atau keterbatasan kapasitas penyaringan (Alimi et al., 2018; Koutnik et al., 2021).

Lebih lanjut, dalam konteks industri otomotif, mikroplastik tidak hanya berasal dari proses produksi tetapi juga dari bahan baku yang digunakan seperti PP, PET, dan LDPE. Bahan-bahan ini sering digunakan dalam komponen otomotif karena ketahanannya terhadap panas dan fleksibilitasnya. Namun, dalam proses produksi dan pembuangan, terutama dari spray booth dan water jet, bahan-bahan ini dapat terfragmentasi menjadi mikroplastik dan memasuki aliran limbah (Tang, 2025; Değirmenci, 2024). Penelitian oleh Sa'diyah (2020) bahkan menunjukkan bahwa paparan sinar UV dan turbulensi air dapat mempercepat fragmentasi LDPE menjadi partikel kecil yang berpotensi berbahaya. Hal ini sejalan dengan temuan Mortula (2021) yang menunjukkan bahwa fragmentasi LDPE dalam sistem pengolahan air limbah dapat menghasilkan hingga 69,7 mg/L mikroplastik dan meningkatkan turbiditas secara signifikan.

Di Indonesia, tantangan dalam pengelolaan limbah mikroplastik semakin kompleks karena keterbatasan infrastruktur dan teknologi pengolahan yang memadai. Berdasarkan laporan Hale et al. (2022), hanya sekitar 50% dari limbah cair industri di Indonesia yang diproses melalui instalasi pengolahan yang sesuai. Ini menjadi masalah besar, mengingat Indonesia juga menghadapi tekanan besar dari pencemaran mikroplastik di perairan domestik dan pesisir (Widyastuti et al., 2023). Penelitian yang dilakukan di berbagai lokasi menunjukkan adanya kontaminasi mikroplastik yang tinggi, yang kemungkinan besar berasal dari sektor industri, termasuk industri otomotif (Ali et al., 2024; Sari et al., 2021; Wicaksono et al., 2023).

Mikroplastik tidak hanya memberikan dampak langsung terhadap lingkungan perairan, tetapi juga menimbulkan risiko bagi kesehatan manusia. Partikel mikroplastik yang terbawa ke badan air dapat dikonsumsi oleh organisme akuatik dan masuk ke rantai makanan, hingga pada akhirnya dikonsumsi oleh manusia. Penelitian oleh Rashid (2023) menegaskan bahwa mikroplastik dapat menjadi vektor pembawa patogen dan senyawa toksik yang membahayakan kesehatan manusia melalui proses bioakumulasi. Oleh karena itu, penting bagi industri otomotif untuk tidak hanya mematuhi regulasi lingkungan, tetapi juga secara proaktif menerapkan teknologi pengolahan limbah yang mampu menyaring mikroplastik secara lebih efisien.

Studi terdahulu dalam bidang pengolahan air limbah industri otomotif umumnya berfokus pada efisiensi IPAL secara umum dalam menurunkan nilai BOD, COD, dan Total Suspended Solids (TSS). Namun, sangat sedikit penelitian yang secara spesifik menganalisis efektivitas setiap tahap dalam sistem IPAL terhadap pengendalian kontaminan mikroplastik. Padahal, menurut Funck et al. (2021), komponen seperti sand filter dan granular activated carbon memiliki potensi tinggi dalam menyaring mikroplastik, terutama jenis PP dan PET, yang umum ditemukan dalam limbah otomotif. Oleh karena itu, terdapat celah penelitian (research gap) yang signifikan dalam literatur terkait efektivitas sistem IPAL terhadap mikroplastik, khususnya dalam konteks industri otomotif di Indonesia.

Berdasarkan pemamparan di atas maka kajian ini bertujuan untuk mengisi kekosongan dalam literatur dengan menganalisis sistem Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) yang diterapkan oleh PT. X dalam mengolah air limbah produksi menjadi *effluent* yang memenuhi standar baku mutu lingkungan. Analisis difokuskan pada efektivitas masing-masing tahap pengolahan mulai dari pra-perlakuan hingga pengolahan tersier dalam menurunkan parameter pencemar utama seperti *Biological Oxygen Demand* (BOD), *Chemical Oxygen Demand* (COD), *Total Suspended Solids* (TSS), serta mikroplastik. Selain itu, artikel ini mengidentifikasi tantangan teknis yang menyebabkan dua parameter utama, yakni COD dan BOD, belum sepenuhnya memenuhi klasifikasi golongan I berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No. 5 Tahun 2014. Berdasarkan temuan tersebut, kajian ini menyusun rekomendasi strategis berupa integrasi teknologi filtrasi lanjutan seperti membran (ultra/nano/reverse osmosis) dan sistem kontrol otomatis berbasis *Proportional-Integral-Derivative* (PID) guna meningkatkan efisiensi dan keandalan IPAL secara berkelanjutan. Dengan pendekatan ini, artikel diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan praktik pengelolaan air limbah berbasis mikroplastik di sektor otomotif, serta memperkaya literatur ilmiah mengenai pengolahan air limbah industri di negara berkembang.

## METODE

### Desain Penelitian dan Pendekatan Studi Literatur

Penelitian ini merupakan studi literatur dan analisis data sekunder. Studi literatur dilakukan untuk memperoleh pemahaman menyeluruh mengenai sistem Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) di industri otomotif, khususnya yang berkaitan dengan pengendalian mikroplastik, serta efektivitas tiap tahap dalam proses pengolahan air limbah. Literatur yang dikaji diperoleh dari basis data ilmiah seperti Scopus dan Google Scholar dengan kata kunci: “IPAL”, “air effluent”, “automotive wastewater”, “microplastic removal”, dan “wastewater treatment plant (WWTP)”.

Kriteria inklusi untuk pemilihan literatur mencakup:

1. Artikel jurnal ilmiah yang terbit antara tahun 2015–2025,
2. Studi yang relevan dengan konteks pengolahan limbah industri, terutama di sektor otomotif,
3. Literatur yang membahas efektivitas teknologi pengolahan mikroplastik.

Sebanyak 25 artikel dikompilasi dan dikaji secara sistematis. Penggunaan metode ini sejalan dengan panduan sistematik yang dikemukakan oleh Muga dan Mihelcic (Miguel, 2023), yang menekankan pentingnya validasi terhadap praktik terbaik dalam manajemen limbah. Pendekatan sistematik ini memungkinkan peneliti untuk memahami tren ilmiah terkini dan menghindari duplikasi dari penelitian sebelumnya.

### **Pengumpulan dan Pemanfaatan Data Sekunder**

Pengumpulan data sekunder merupakan bagian integral dari kajian ini, dengan sumber data berasal dari dokumentasi internal PT. X yang meliputi:

1. Hasil uji kualitas air effluent tahun 2024, yang terdiri atas 33 parameter (Lihat *Tabel 1* dalam bagian Temuan),
2. Neraca pemanfaatan air tahun 2023, yang menunjukkan volume pemakaian air tanah dalam,
3. Dokumen perencanaan sistem IPAL, termasuk rancangan teknis dan kapasitas instalasi,
4. Catatan pengelolaan limbah B3, terkait jenis dan volume limbah berbahaya yang ditangani,
5. Flowchart sistem IPAL (Gambar 2), yang menjelaskan urutan unit pengolahan,
6. Dokumen Analisis Mengenai Dampak Lingkungan (AMDAL).

Data ini digunakan untuk menilai efektivitas sistem IPAL dalam menurunkan konsentrasi polutan serta mengevaluasi kepatuhan terhadap baku mutu air limbah berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No. 5 Tahun 2014, Lampiran XLVII.

### **Teknik Analisis Data**

Penelitian ini menggunakan analisis deskriptif untuk menyajikan, menginterpretasikan, dan mensintesis data yang diperoleh dari studi literatur dan data sekunder. Pendekatan ini digunakan karena mampu memberikan gambaran menyeluruh dan sistematik mengenai karakteristik sistem pengolahan air limbah, termasuk komponen teknologi, tantangan teknis, serta efektivitas pengolahan mikroplastik.

Metode deskriptif dinilai efektif dalam berbagai kajian lingkungan, seperti ditunjukkan dalam studi Tembo dan Mwanza (2024), yang memanfaatkan pendekatan ini untuk menganalisis limbah pangan dan praktik pasar. Dalam konteks pengelolaan limbah industri, metode ini digunakan untuk menjelaskan hubungan antara struktur IPAL, kualitas effluent, dan keberhasilan pengendalian kontaminan spesifik seperti COD, BOD, dan mikroplastik.

### **Relevansi dan Justifikasi Metodologi**

Penggunaan studi literatur dan data sekunder dalam konteks ini tidak hanya relevan secara teknis, tetapi juga penting secara praktis, mengingat karakteristik sistem IPAL yang kompleks dan berbasis teknologi multi-tahap. Kajian oleh Cristaldi et al. (2020) dan Bayo et al. (2020) menunjukkan bahwa sistem IPAL dengan tahapan tersier seperti membrane bioreactor (MBR), sand filter, dan carbon filter mampu mengurangi mikroplastik hingga lebih dari 75%, namun tidak menjamin penghilangan total. Oleh karena itu, kombinasi literatur global dan data lapangan lokal memberikan kerangka kerja yang komprehensif untuk mengevaluasi performa sistem IPAL di PT. X.

Selain itu, integrasi analisis deskriptif terhadap data hasil uji effluent tahun 2024 (Tabel 1) memperkuat validitas evaluasi terhadap parameter yang belum memenuhi klasifikasi golongan I, seperti COD sebesar 164,9 mg/L dan BOD sebesar 114,7 mg/L, yang mengindikasikan perlunya optimalisasi sistem, khususnya pada tahap primary dan tertiary treatment.

### **Konteks Teknologi dan Inovasi Pengolahan**

Literatur yang ditelaah juga mencakup teknologi emerging dan inovatif, seperti:

1. Advanced Oxidation Processes (AOPs) (Xie, 2024),
2. Membrane filtration system (ultrafiltration, nanofiltration, reverse osmosis) (Raksaman, 2024),

3. Electrocoagulation dan microbial fuel cells (MFCs) (Fazli et al., 2018),
4. Bioremediasi berbasis mikroalga dan bakteri indigenous (Jabri et al., 2020; Rashid, 2023).

Kajian ini memberikan landasan untuk menyusun rekomendasi teknis yang lebih tepat sasaran dalam konteks industri otomotif di negara berkembang.

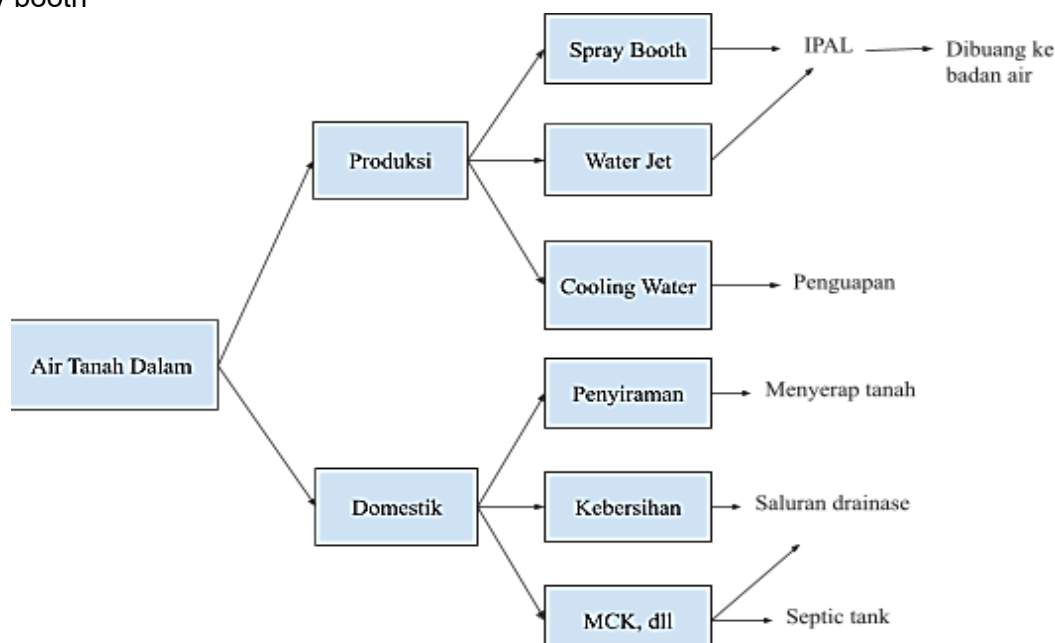
### Keterbatasan dan Antisipasi

Meskipun data sekunder memberikan banyak informasi, keterbatasan seperti tidak adanya data *real-time* atau inkonsistensi pencatatan menjadi perhatian. Oleh karena itu, validasi silang dilakukan dengan membandingkan parameter effluent yang dihasilkan PT. X dengan studi kasus sejenis dari literatur, misalnya studi oleh Talvitie et al. (2017) yang menunjukkan bahwa effluent dari WWTP di sektor industri lain tetap mengandung sisa mikroplastik meskipun telah melalui pengolahan tersier.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Skema Pemanfaatan Air Perusahaan

Setiap bulan, PT X memanfaatkan air tanah dalam untuk produksi headlining. Berdasarkan catatan perusahaan, PT tersebut telah memanfaatkan air sebesar 2.131m<sup>3</sup> (Mei 2025) dengan rata - rata 1.901,4m<sup>3</sup>/bulan selama 2025 atau setara dengan 99.0m<sup>3</sup>/hari. Sebagian besar total tersebut disalurkan ke penggunaan domestik (penyiraman dan kebersihan) dan kurang lebih 10 persen disalurkan ke alat produksi, yaitu water jet dan spray booth



**Gambar 1.** Skema Pemanfaatan Air Per Bulan.

### Spray Booth

Spray booth merupakan alat yang mendistribusikan campuran air dengan 5% katalis ke permukaan foam agar mengaktifkan lem smart bond untuk melekat pada lapisan headliner. Katalis yang digunakan adalah TEDA L-33 katalis yang merupakan cairan katalis amina untuk mengaktifkan lem di polyurethane. TEDA L33 mengandung 33% TEDA (juga dikenal sebagai trietilen diamin atau 1,4-diazabisisiklo[2.2.2]oktana) dan 66,7% dipropelin glikol. Katalis tersebut kemudian akan mengaktifkan lem bond dan mengikat permukaan foam dengan non-woven fabric, glass fiber, dan LDPE Thermofusible film. Setiap kali produk melewati proses ini, ada cairan eksek yang menyumbang kontaminasi minyak dan lemak dari katalis amina. Oleh karena itu cairan eksek tersebut langsung disalurkan ke sistem IPAL untuk diolah lebih lanjut.

### Water Jet

Water jet merupakan alat cutting manufaktur yang mempertimbangkan flow rate, diameter aliran, dan tekanan air untuk memotong secara sempurna sesuai dengan

ketebalan dan rigiditas produk. Dalam perusahaan ini, water jet digunakan untuk memotong headliner mobil dan berada di tahap sesudah layering dan forming. Oleh karena itu, limbah cair yang dihasilkan dari proses tersebut bukan hanya debree polyurethane tetapi juga debree dari lapisan headlining lainnya yang bersifat mencemari lingkungan yaitu bahan fabric non woven dari polypropylene (PP) dan needle-punch non woven fabric polyethylene terephthalate (PET), thermofusible film, dan glass fiber low density polyethylene (LDPE). Pertama, polyurethane mampu terhidrolisis dan menjadi sarang bagi mikroorganisme (bakteri, fungi) untuk berkembang jika berada dalam air dan kondisi kelembaban selama 24 jam sehingga mampu meningkatkan kadar polutan biologis (BOD) (Katarzyna Krasowska, 2015).

#### **a. Fabric non woven**

Kedua, fabric non woven polypropylene (PP) dan needle-punch non woven fabric polyethylene terephthalate (PET) menyumbang peningkatan nilai suspended solid yang akhirnya mengalir secara kolektif sebagai Total Suspended Solid (TSS) berupa mikroplastik hingga nanoplastics (DEĞİRMENÇİ, 2024). Secara spesifik, walaupun PET non woven fabric resist secara kimiawi, tetapi bahan tersebut mampu mengalami chain scission (pemutusan rantai) dari cahaya atau suhu. Contohnya ketika air panas dengan suhu 950C dituangkan ke teabag maka mampu menghasilkan mikroplastik dan nano plastik sebanyak 11,6 miliar dan 3,1 miliar berturut (Tang, 2025). Sedangkan fabric non woven dari polypropylene (PP) berkontribusi kepada peningkatan Chemical Oxygen Demand (COD), penurunan Dissolved Oxygen (DO), dan keasaman nilai pH dalam air (Khoironi, 2024).

#### **b. Low Density Polyethylene (LDPE) Thermofusible Film**

Low Density Polyethylene (LDPE) merupakan jenis plastik poliolefin kode 4 yang memiliki sifat fleksibel, tahan lama terhadap kelembaban dan suhu, serta bahan kimia tertentu. LDPE dapat digunakan untuk fungsi domestik dan fungsi lainnya seperti fungsi otomotif dalam bentuk thermofusible film. Walaupun LDPE dikenal tahan akan fotodegradasi, tetapi dengan faktor lain seperti kecepatan aliran air, waktu serta keberadaan sedimen mampu melemahkan, memecahkan, dan mengkontaminasi air. Paparan sinar UV mampu memulai proses degradasi dan pelapukan LDPE sehingga melemahkan ikatan polimer. Ini disebabkan oleh keberadaan aktivitas radikal bebas yang mengikat karbon serta hidrogen dari LDPE ke oksigen air menjadi gugus hidroksil dan karbonil sehingga terjadinya penurunan kadar oksigen (DO) dan kenaikan kadar polutan kimia (COD). Dilanjutkan turbulensi sedimen/pasir yang bergesekan dengan LDPE serta aliran air stagnan/dinamis menyebabkan LDPE terfragmentasi (Sa'diyah, 2020). Jika LDPE terfragmentasi maka menghasilkan 69,7 mg/L mikroplastik dan meningkatkan turbiditas sebanyak 1,6 kali (Mortula, 2021).

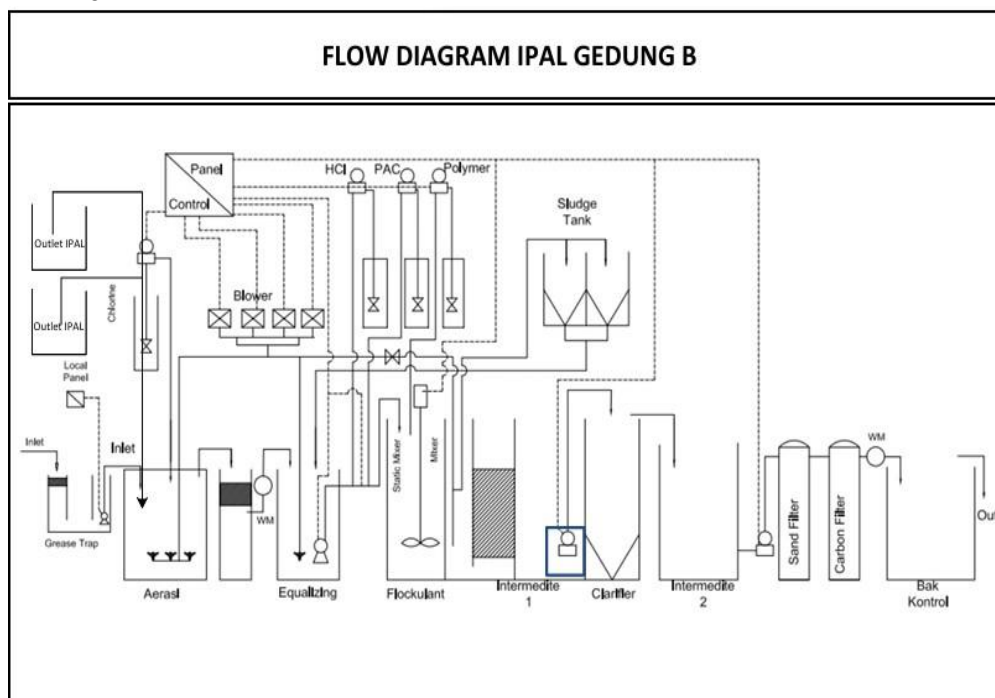
#### **c. Glass Fiber**

Glass fiber merupakan bahan pengerat antara lapisan foam dengan non-woven fabric serta menjadi kontributor peredam suara di headliner. Glass fiber mampu mencemari air melalui kontaminasi secara berkala hingga muncul efek toksik (Kumar, 2024). Ditemukan bahwa bahan fiberglass setelah direndam selama 3 jam bukan hanya menghilangkan tensile residual strength fiberglass, tetapi akan menghasilkan kontaminasi yang signifikan terhadap air secara fisik dan kimiawi. Secara fisik, fiber glass mampu meningkatkan turbiditas air sebesar 143 NTU hingga 299 NTU yang awalnya hanya 0,88 NTU. Secara kimiawi, nilai pH menjadi lebih basa dari 7,38 meningkat ke 11,97. Ini disebabkan juga oleh konsentrasi logam berat yang semakin meningkat seperti nilai Boron (B) dari 0,003 menjadi 0,584, Natrium (Na<sup>+</sup>) dari 9,6 menjadi 730,0, dan Zink (Zn) dari 0,025 menjadi 7,430. Bukan hanya itu, tetapi total organic compound (TOC) juga meningkat secara pesat hingga mampu mencapai total 10 kali lipat dari total awal (Tihomirova, 2019).

### **Sistem IPAL**

Terdapat empat tahap sistem IPAL yang dibangun, yaitu pre treatment, primary treatment, secondary treatment, dan tertiary treatment. Alat pre-treatment berupa grease trap (GT), aerasi, dan equalizing. Sedangkan untuk primary treatment mereka hanya menggunakan flokulan static mixer. Akhirnya di secondary treatment terdapat dua intermediate, clarifier dan terakhir ada tertiary treatment yaitu sand filter, carbon filter, dan

terakhir bak kontrol. Jika dirangkum dari awal hingga akhir; water intake dari air limbah produksi - GT - aerasi - equalizing - flokulan - intermediate 1 - clarifier - intermediate 2 - sand filter - carbon filter - bak kontrol - pembuangan ke badan air. Sistem IPAL ini mampu menghasilkan debit sebesar 1,6m<sup>3</sup>/hari dan mencapai kualitas air limbah secara kimia, fisik, dan mikrobiologi sesuai dengan kualitas standar dari Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No.5 Tahun 2014.



**Gambar 2.** Flow Diagram IPAL Gedung Headline di PT.DWA

#### a. Pre-treatment

Pre-treatment. Pertama, intake dari water dan spray booth tank akan dikumpulkan dalam outlet IPAL yang berbeda. Kemudian, air dari sludge tank akan dialirkan melalui inlet ke tahap aerasi mekanis dimana ada tiga blower yang fungsinya untuk meningkatkan nilai Dissolved Oxygen (DO) agar terjadinya biodegradasi aerobik sehingga mereduksi kontaminan coliform dan limbah organik lainnya (Nguyen, 2024). Minyak, lemak, dan padat tersuspensi yang tertahan di aerasi akan disedot oleh Grease Trap agar mencapai penyaringan dan pemusnahan minyak, lemak, dan padat tersuspensi dari air limbah secara maksimal dan agar tidak ada flogging pada alat selanjutnya (Ali, 2022). Kemudian air aerasi akan tumpah dan bergabung dengan air water jet dan spray booth yang sudah dicampur dengan chlorine. Chlorine berfungsi untuk menghilangkan sifat fisik seperti bau dan warna. Di tahap terakhir pretreatment yaitu equalizer berfungsi sebagai pemerataan aliran dan konsentrasi polutan dalam air sebelum masuk ke primary treatment agar lebih konsisten dan merata di proses pengolahan hilir.

#### b. Primary Treatment

Pengolahan di madya hanya terdapat satu alat yaitu flokulan. Flokulan merupakan pengolahan air fisikokimia yang bertugas untuk mengumpulkan gumpalan padatan kecil menjadi besar (sedimen). Air dari pre-treatment kemudian disalurkan ke flokulan untuk penanganan lebih lanjut, khususnya dalam aspek fisik dan mikrobiologi. Dalam flokulan, ada koagulan yang dicampur sebelumnya berupa bahan poly-aluminum chloride (PAC) yang berfungsi untuk menghilangkan Chemical Oxygen Demand (COD) dan Total Suspended Solid (TSS) (Bakar, 2013) dan HCl sebagai pengendali pH karena PAC bekerja secara optimum dalam rentang pH 7,1 - 7,5 (Nor et al., 2020). Setelah itu air akan diaduk lambat di flokulan bersamaan dengan polimer organik yang mengikat partikel kecil menjadi gumpalan besar, menambahkan beban partikel sehingga mengendap oleh gravitasi (Badawi et al., 2023). Proses tersebut mampu menyingkirkan 80% TSS dan 45% COD (Lasaki et al., 2023). Secara keseluruhan, primary treatment merupakan tahap pengolahan yang fokus kepada pemisahan padatan dari air sehingga menghasilkan air yang lebih jernih dan layak



### c. Secondary Treatment

Dalam tahap secondary terdapat tiga alat yaitu dua intermediate dan clarifier. Intermediate pertama berfungsi sebagai alat perantara untuk mengekstrak sludge ke sludge tank. Selanjutnya, clarifier digunakan untuk menjernihkan air dengan mengendapkan sisa-sisa polutan menjadi sludge dan air overflow ke intermediate kedua agar padatan dapat diam di bawah dan air bersih tumpah ke intermediate. Proses secondary treatment lebih fokus kepada ekstraksi sedimen dan pembersihan polutan padatan tersuspensi serta turbiditas air.

### d. Tertiary Treatment

Setelah semua sludge sudah tersaringkan, maka lanjut ke sand filter dan karbon filter yang merupakan tertiary treatment. Sand filter berperan penting dalam menyaring dan menyimpan mikroplastik, sebab bahan headliner memiliki beberapa mikroplastik dari PP, PET, dan LDPE. Secara umum, sand filter mampu meretensi sebanyak rata - rata 79% dari total mikroplastik, lebih detailnya 94% PP dan 87% PET (Funck et al., 2021). Selain itu, mereka juga menghilangkan turbiditas, COD, BOD, dan ammonia nitrogen (NH<sub>3</sub>-N) (Chan et al., 2021) serta mencegah pertumbuhan bahan organik pada karbon filter (Svahn & Borg, 2024). Sedangkan, karbon filter merupakan alat yang menghilangkan bau, turbiditas, senyawa organik, dan logam berat. Jenis carbon filter yang digunakan adalah granular carbon filter. Granular carbon filter memiliki beberapa lapisan partikel berbentuk granular yang kaya akan karbon dan bersifat anaerobik sehingga karbon granular diaktivasi oleh panas. Mirip dengan sand filter, GAC juga mampu mengurangi COD, TSS, turbiditas, (NH<sub>3</sub>-N) (Chan et al., 2021), dan mikropolutan seperti mikroorganisme (total coliform) dan mikroplastik (Mailler, 2024). Namun yang membedakan adalah GAC mampu menghilangkan logam berat secara signifikan (Cd, Cu, Ni, Pb) (Mailler, 2024). Disimpulkan bahwa seluruh proses tertiary treatment merupakan proses yang menyingkirkan seluruh polutan air dari aspek kimia, fisik, dan mikrobiologi.

### Hasil Uji Effluent Water

Setelah air dari spray booth dan water jet melalui proses IPAL telah ditemukan bahwa kualitas air effluent sudah sesuai dengan standar Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No.5 Tahun 2014.

**Tabel 1.** Hasil Uji Air Effluent di Gedung Produksi Headliner PT.DWA

| Parameter                             | Hasil Uji | SBMKL (Permen LH No.5 Tahun 2014, Lampiran XLVII) | Satuan | Golongan (I/II) |
|---------------------------------------|-----------|---------------------------------------------------|--------|-----------------|
| Zat Padat Terlarut (TDS)              | 481       | 2000                                              | mg/L   | I               |
| Zat Padat Tersuspensi (TSS)           | 11        | 200                                               | mg/L   | I               |
| pH                                    | 8,21      | 6,00-9,00                                         | -      | -               |
| Ammonia Nitrogen (NH <sub>3</sub> -N) | <0,022    | 5                                                 | mg/L   | I               |
| Nitrit (NO <sub>2</sub> )             | 0,07      | 1                                                 | mg/L   | I               |
| Chemical Oxygen Demand (COD)          | 164,9     | 100 - 300                                         | mg/L   | II              |
| Fluorida (F)                          | <0,05     | 2                                                 | mg/L   | I               |
| Besi Terlarut (Fe)                    | 0,43      | 5                                                 | mg/L   | I               |
| Mangan Terlarut (Mn)                  | <0,05     | 2                                                 | mg/L   | I               |
| Barium Total (Ba)                     | <0,6      | 2                                                 | mg/L   | I               |
| Tembaga Total (Cu)                    | <0,1      | 2                                                 | mg/L   | I               |
| Seng Total (Zn)                       | <0,022    | 5                                                 | mg/L   | I               |
| Kromium Total (Cr)                    | <0,1      | 0,5                                               | mg/L   | I               |
| Nikel Total (Ni)                      | <0,2      | 0,2                                               | mg/L   | I               |
| Kobalt Total (Co)                     | <0,3      | 0,4                                               | mg/L   | I               |
| Kadmium Total (Cd)                    | <0,02     | 0,05                                              | mg/L   | I               |
| Timbal Total (Pb)                     | <0,03     | 0,1                                               | mg/L   | I               |
| Merkuri Total (Hg)                    | <0,001    | 0,002                                             | mg/L   | I               |



| Parameter                       | Hasil Uji | SBMKL (Permen LH No.5 Tahun 2014, Lampiran XLVII) | Satuan | Golongan (I/II) |
|---------------------------------|-----------|---------------------------------------------------|--------|-----------------|
| Stanum Total (Sn)               | <1        | 2                                                 | mg/L   | I               |
| Arsen Total (As)                | <0,01     | 0,1                                               | mg/L   | I               |
| Selenium Total (Se)             | <0,001    | 0,05                                              | mg/L   | I               |
| Krom Heksavalen (Cr6+)          | <0,06     | 0,1                                               | mg/L   | I               |
| Nitrat (NO <sub>3</sub> )       | 0,6       | 20                                                | mg/L   | I               |
| Deterjen (MBAS)                 | 0,3       | 5                                                 | mg/L   | I               |
| Biological Oxygen Demand (BOD)  | 114,7     | 50 - 150                                          | mg/L   | II              |
| Total Nitrogen (N)              | 3,5       | 30                                                | mg/L   | I               |
| Sianida (CN)                    | <0,001    | 0,05                                              | mg/L   | I               |
| Asam Sulfida (H <sub>2</sub> S) | <0,02     | 0,5                                               | mg/L   | I               |
| Klorin Bebas (Cl <sub>2</sub> ) | <0,01     | 1                                                 | mg/L   | I               |
| Fenol                           | <0,01     | 1                                                 | mg/L   | I               |
| Minyak dan Lemak                | <1        | 10                                                | mg/L   | I               |
| Total Coliform                  | 7800      | 10000                                             | mg/L   | I               |
| Suhu                            | 29,9      | 38                                                | 0C     | I               |

Dari 33 kriteria pengujian air limbah terdapat 31 yang memenuhi kriteria golongan I sehingga dinyatakan nilainya masih jauh aman dari bahaya. Namun ada 2 dari 33 kriteria yang masuk dalam golongan II yaitu COD dan BOD. Tingginya nilai COD dan BOD dapat disebabkan dari beberapa faktor yaitu perawatan berkala yang kurang konsisten dan baik, alat filtrasi yang kurang lengkap, faktor eksternal yang tidak bisa dikendalikan, dll. Hasil tersebut mengindikasikan bahwa kontaminasi dalam air masih tinggi dengan polutan mikroorganisme organik maupun anorganik (Saputri et al., 2023). Secara keseluruhan, sistem IPAL di PT. X sukses dalam menangani air limbah menjadi air effluent yang layak dibuang ke badan air berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No.5 Tahun 2014 dengan beberapa catatan yang harus diperhatikan agar mencegah ke permasalahan lebih lanjut.

### Tingginya Nilai COD dan BOD

Pertama, nilai COD bisa tinggi dari nilai BOD disebabkan oleh senyawa lebih banyak mampu teroksidasi secara kimiawi daripada secara biologis. Ditambahkan oleh pengukuran BOD disatukan dengan pengukuran COD karena ada beberapa unsur senyawa BOD di dalam COD sehingga pengukuran COD kadang tidak murni polutan kimia (Abu Shmeis, 2018). Kedua, sistem IPAL kurang mempertimbangkan keberadaan mikroplastik dan nanoplastik sehingga dapat berpotensi meningkatkan nilai COD atau pun BOD (Kwon et al., 2022; Lestari et al., 2025). Ketiga, alat IPAL yang kurang tepat untuk mengendalikan polutan mikroplastik. Alat yang tepat untuk ditambahkan dalam proses IPAL tersebut adalah sistem filtrasi multimembrane yang mampu memisahkan partikel padat dengan ukuran <200µm (Raksaman, 2024). Terakhir adalah cek rutin dan penanganan yang kurang baik. Ini menyebabkan berbagai parameter meningkat secara perlahan dan merusak alat yang sudah kadaluarsa. Seharusnya alat IPAL dipantau secara proaktif melalui prinsip penanganan Proportional-Integral-Derivative (PID) agar menghindari dari eror yang terduga maupun tak terduga (Gu et al., 2023).

### KESIMPULAN

PT. X berhasil dalam menangani air limbah dari produksi menjadi air effluent yang layak dibuang ke badan air berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No.5 Tahun 2014. Air limbah produksi yang mengandung kontaminan organik maupun anorganik, anaerobik maupun aerobik menjadi air limbah yang terkendali (air effluent). 31 dari 33 kriteria memenuhi standar baku mutu golongan I dan 2 dari 33 masuk ke dalam golongan II. Hal tersebut disebabkan oleh keberadaan nanoplastik dan mikroplastik yang belum dipertimbangkan dalam penyaringan sistem IPAL sebelumnya sehingga mampu meningkatkan kontaminan kimia (COD) ataupun biologis (BOD). Oleh karena itu masih ada beberapa aspek yang kurang maksimal dalam pengendalian air produksi.

## REKOMENDASI

Jika PT. X ingin meningkatkan efisiensi dan efektivitas IPAL maka harus lebih diperhatikan dalam segi teknis. Bahan headliner banyak mensintesis mikroplastik sehingga lebih baik jika menggunakan alat yang lebih tepat seperti membrane filter (ultra filter, nanofilter, microfilter, dan reverse osmosis) yang mampu mengeliminasi partikel sebesar  $<200\mu\text{m}$  (Raksaman, 2024). Untuk Grease trap, harus lebih dipertimbangkan terkait viskositas air limbah dan flow rate agar dapat mengidentifikasi dengan baik tekanannya karena jika terlalu tinggi maka Total Dissolved Solid (TDS) lolos dan GT kurang efektif (Muhardi, et al 2022). Untuk bahan polymer, proses tersebut sebaiknya diletakkan bertepatan di pretreatment agar mendapatkan hasil lebih maksimal menyingkirkan Total Suspended Solid (TSS) dan COD (Lasaki et al., 2023). Terakhir, jika PT. X berencana membuat water cycle industri yang mengutilisasi air kembali untuk fungsi produksi dan fungsi domestik seperti konsumsi dan Mandi, Cuci, Kakus (MCK) maka ada beberapa hal teknis dan peraturan yang harus dipertimbangkan. Pertama, teknologi yang digunakan harus lebih maju karena polutan air harus dimusnahkan seperti total coliform dan TSS. Kedua, penanganan rutin dan pemanfaatan alat harus rajin dilakukan sebab alat filtrasi seperti membrane filter harus dipantau dan harus di backwash berkala. Ketiga, hal teknis harus diperhatikan seperti flow rate, lebar diameter aliran, dan lebar membrane yang mampu memberikan penyaringan yang optimal. Terakhir adalah matriks peraturan yang harus ditetapkan. Ada beberapa kebijakan yang bisa dipakai yaitu Guidelines for Drinking Water Quality (GDWQ) dari World Health Organization (WHO) atau Peraturan Menteri Kesehatan No.2 Tahun 2023 yang mengatur Standar Baku Mutu Air Minum Layak dan Aman untuk dikonsumsi sehari - hari. Standar yang ditetapkan dari kedua kebijakan jauh lebih ketat dibanding peraturan yang sedang berlangsung. Agar mencapai hal itu, diperlukan konsep serta eksekusi yang detail dan teliti dalam segi teknis maupun administrasi supaya menghindari dari bahaya kesehatan seperti water-borne disease atau vector-borne disease yang memanfaatkan air sebagai reservoir mereka.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada semua pihak yang telah berkontribusi dalam penyelesaian artikel ini. Ucapan terima kasih khusus ditujukan kepada institusi, rekan sejawat, serta yang telah memberikan dukungan, masukan, dan informasi berharga dalam proses penelitian hingga penyusunan artikel dapat terselesaikan dengan baik.

## DAFTAR PUSTAKA

- Ali, A., Khalid, A., Razak, N., Maulana, N., Roslan, N., Razmi, R., ... & Anuar, S. (2024). A review on the presence of microplastics in environmental matrices within southeast asia: elucidating risk information through an analysis of microplastic characteristics such as size, shape, and type. *Water Emerging Contaminants & Nanoplastics*, 3(2). <https://doi.org/10.20517/wecn.2023.73>
- Ali, M. A. H. B. A. (2022). The Combination of a Previous Kitchen Waste Grease Trap for Fat, Oil, and Grease for Pre-Treatment. *Journal of Advancement in Environmental Solution and Resource Recovery*, 2(2), 37-43. <https://doi.org/10.30880/jaesrr.2022.02.02.005>
- Alimi, O., Farner, J., Hernandez, L., & Tufenkji, N. (2018). Microplastics and nanoplastics in aquatic environments: aggregation, deposition, and enhanced contaminant transport. *Environmental Science & Technology*, 52(4), 1704-1724. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b05559>
- Badawi, A. K., Salama, R. S., & Mostafa, M. M. (2023). Natural-based coagulants/flocculants as sustainable market-valued products for industrial wastewater treatment: a review of recent developments. *RSC Advances*, 13. [10.1039/d3ra01999c](https://doi.org/10.1039/d3ra01999c)
- Bakar, A. F. A. (2013). Treatment of automotive wastewater by coagulation-flocculation using poly-aluminum chloride (PAC), ferric chloride (FECL3) and aluminum sulfate (alum). The 2013 UKM FST Postgraduate Colloquium: *Proceedings of the Universiti Kebangsaan Malaysia, Faculty of Science and Technology 2013 Postgraduate Colloquium*, 1571(1). <https://doi.org/10.1063/1.4858708>

- Bayo, J., López-Castellanos, J., & Olmos, S. (2020). Abatement of microplastics from municipal effluents by two different wastewater treatment technologies.. <https://doi.org/10.2495/wp200021>
- Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2018). Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches. SAGE Publications.
- Cristaldi, A., Fiore, M., Zuccarello, P., Conti, G., Grasso, A., Nicolosi, I., ... & Ferrante, M. (2020). Efficiency of wastewater treatment plants (wwtps) for microplastic removal: a systematic review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(21), 8014. <https://doi.org/10.3390/ijerph17218014>
- Değirmenci, Z. (2024). Selecting the Optimum Amount of Recycled Polypropylene Nonwoven Waste in Spunbond Production for Sustainability. *Eskişehir Technical University Journal of Science And Technology A- Applied Sciences And Engineering*, 25(4). [10.18038/estubtda.1432783](https://doi.org/10.18038/estubtda.1432783)
- Fazli, N., Mutamim, N., & Ali, M. (2018). Microbial fuel cell (mfc) in treating spent caustic wastewater. *Journal of Chemical Engineering and Industrial Biotechnology*, 3(1), 17-25. <https://doi.org/10.15282/jceib.v3i1.3876>
- Funck, M., Al-Azzawi, M. S.M., YilDIRIM, A., & Knoop, O. (2021). Release of microplastic particles to the aquatic environment via wastewater treatment plants: *The impact of sand filters as tertiary treatment*. *Chemical Engineering Journal*, 426. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130933>
- Ghanad, A. (2023). An Overview of Quantitative Research Methods. *International Journal of Multidisciplinary Research and Analysis*, 6(8), 10.
- Gu, Y. (2023). Optimization and control strategies of aeration in WWTPs: A review. *Journal of Cleaner Production*, 418. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138008>
- Hale, R., King, A., Ramirez, J., Guardia, M., & Nidel, C. (2022). Durable plastic goods: a source of microplastics and chemical additives in the built and natural environments. *Environmental Science & Technology Letters*, 9(10), 798-807. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00417>
- Indonesia. (2014). Permen LH No. 5 Tahun 2014. Kementerian Koordinator Maritim & Investasi. Retrieved July 24, 2025, from <https://jdih.maritim.go.id/en/peraturan-menteri-negara-lingkungan-hidup-no-5-tahun-2014>
- Indonesia. (2023). Permenkes No. 2 Tahun 2023. Kementerian Kesehatan. Retrieved July 24, 2025, from <https://peraturan.bpk.go.id/Details/245563/permenkes-no-2-tahun-2023>
- Jabri, H., Das, P., Khan, S., Thaher, M., & AbdulQuadir, M. (2020). Treatment of wastewaters by microalgae and the potential applications of the produced biomass—a review. *Water*, 13(1), 27. <https://doi.org/10.3390/w13010027>
- Jin, T., Tang, J., Lyu, H., Wang, L., Gillmore, A., & Schaeffer, S. (2022). Activities of microplastics (mps) in agricultural soil: a review of mps pollution from the perspective of agricultural ecosystems. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 70(14), 4182-4201. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c07849>
- Khoironi, A. (2024). The Influence of Polypropylene Non-woven Plastic Waste on Alfisol Soil Quality. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1414. [10.1088/1755-1315/1414/1/012037](https://doi.org/10.1088/1755-1315/1414/1/012037)
- Koutnik, V., Alkidim, S., Leonard, J., Deprima, F., Cao, S., Hoek, E., ... & Mohanty, S. (2021). Unaccounted microplastics in wastewater sludge: where do they go?. *Acs Es&t Water*, 1(5), 1086-1097. <https://doi.org/10.1021/acsestwater.0c00267>
- Kumar Das, C. (Ed.). (2015). Thermoplastic Elastomers: Synthesis and Applications. Intech Open.
- Kumar, S. S. (2024). Assessment of Life Cycle and Environmental Impact Hotspots Associated with the Construction and Disposal of Fiberglass Reinforced Plastic Fishing (FRP) Boats in the Small-Scale Fishing Sector of India: *LCA of small-scale FRP fishing boats*. *Fishery Technology*, 61(4). [10.56093/ft.v61i4.153466](https://doi.org/10.56093/ft.v61i4.153466)
- Kwon, H., Hidayaturrehman, H., Peera, S., & Lee, T. (2022). Elimination of microplastics at different stages in wastewater treatment plants. *Water*, 14(15), 2404. <https://doi.org/10.3390/w14152404>
- Lasaki, B. A., Maurer, P., Maurer, Harald Schonberger, P., & Alvarez, E. P. (2023). Empowering municipal wastewater treatment: Enhancing particulate organic carbon

- removal via chemical advanced primary treatment. *Environmental Technology & Innovation*, 32. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103436>
- Lestari, P. (2025). Spatial distribution of microplastic pollution and its relation to pollution index-based water quality status in Progo River, Indonesia. *Emerging Contaminants*, 11(3). <https://doi.org/10.1016/j.emcon.2025.100510>
- M R A A, C., Kasmuri, N., Ahmad, R., Santiago, R., & Ramasamy, S. (2021). Comparison between activated carbon and sand filtration method for water quality enhancement: A case study. *International Conference on Civil and Environmental Engineering*, 646. [10.1088/1755-1315/646/1/012050](https://doi.org/10.1088/1755-1315/646/1/012050)
- Mailler, R. (2024). Mastering granular activated carbon filtration to remove organic micropollutants, antibiotic resistance and metals for municipal wastewater reuse. *Science of the Total Environment*, 952. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175918>
- Mao, X., Xu, Y., Cheng, Z., Yang, Y., Guan, Z., Jiang, L., ... & Tang, K. (2022). The impact of microplastic pollution on ecological environment: a review. *Frontiers in Bioscience-Landmark*, 27(2). <https://doi.org/10.31083/j.fbl2702046>
- Michielssen, M., Michielssen, E., Ni, J., & Duhaime, M. (2016). Fate of microplastics and other small anthropogenic litter (sal) in wastewater treatment plants depends on unit processes employed. *Environmental Science Water Research & Technology*, 2(6), 1064-1073. <https://doi.org/10.1039/c6ew00207b>
- Miguel, J. (2023). Wastewater treatment and reuse for sustainable water resources management: a systematic literature review. *Sustainability*, 15(14), 10940. <https://doi.org/10.3390/su151410940>
- Mortula, M. M. (2021). Leachability of microplastic from different plastic materials. *Journal of Environmental Management*, 294. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112995>
- Muhardi, J., Nurhadi, N., Widiyanto, M., Pantogomo, A., Faryzahri, D., Rizal, F. (2022). Design Innovation of Grease Trap for Wastewater Treatment Arduino-Based. *Proceedings of the 2022 Annual Technology, Applied Science and Engineering Conference (ATASEC 2022)* Vol. 219. Atlantis Press International BV. [doi.org/10.2991/978-94-6463-106-7\\_7](https://doi.org/10.2991/978-94-6463-106-7_7)
- Nguyen, N. T. (2024). A comprehensive review of aeration and wastewater treatment. *Aquaculture*, 591. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2024.741113>
- Nor, A., Mutaqqin, I., & Trianiza, I. (2020). Optimalisasi Dosis Koagulan dan Peningkatan Kinerja Pac (Poly Aluminium Klorida) Dengan Penambahan Kaustik Soda Dalam Proses Pengolahan Air Bersih di PDAM Bandarmasih Kota Banjarmasin Menggunakan Metode Jar Test. *Jurnal JIEOM*. 2620-8184
- Park, H., Oh, M., Kim, P., Kim, G., Jeong, D., Ju, B., ... & Kwon, J. (2020). National reconnaissance survey of microplastics in municipal wastewater treatment plants in korea. *Environmental Science & Technology*, 54(3), 1503-1512. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b04929>
- Peng, J., Wang, J., & Cai, L. (2017). Current understanding of microplastics in the environment: occurrence, fate, risks, and what we should do. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 13(3), 476-482. <https://doi.org/10.1002/ieam.1912>
- Raksaman, S. (2024). Effect of spunbond nonwoven microplastics on dye wastewater treatment via hydrogen peroxide-based catalyst-assisted advanced oxidation processes. *Environmental Advances*, 17. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2024.100567>
- Rashid, M. (2023). Microplastic impact: a concise overview of pollution and effects.. <https://doi.org/10.20944/preprints202312.1612.v1>
- Sa'diyah, A. (2020). Kajian Fragmentasi Low Density Polyethylene Akibat Radiasi Sinar Ultraviolet dan Kecepatan Aliran Air. *Jurnal Teknik ITS*, 9(2).
- Sabrina, A. (2021). Analisis Penggunaan Media Audio Visual pada Pembelajaran Ilmu Pengetahuan Sosial Untuk Meningkatkan Hasil Belajar Siswa di Kelas IV Sekolah Dasar (Studi Literatur).
- Saputri, I., Fatimatuzzahra, & Lestari, Y. (2023). Analisa Kadar COD (Chemical Oxygen Demand) Pada Limbah Cair Disekitar Kawasan Penambangan Batubara Kabupaten Bengkulu Utara. *Organisms*, 3(2).

- Sari, G., Kasasiah, A., Utami, M., & Trihadiningrum, Y. (2021). Microplastics contamination in the aquatic environment of Indonesia: a comprehensive review. *Journal of Ecological Engineering*, 22(10), 127-140. <https://doi.org/10.12911/22998993/142118>
- Shmeis, R. (2018). Water Chemistry and Microbiology. *Comprehensive Analytical Chemistry*, 81. <https://doi.org/10.1016/bs.coac.2018.02.001>
- Svahn, O., & Borg, S. (2024). Assessment of full-scale 4th treatment step for micro pollutant removal in Sweden: Sand and GAC filter combo. *Science of the Total Environment*, 906. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167424>
- Talvitie, J., Mikola, A., Koistinen, A., & Setälä, O. (2017). Solutions to microplastic pollution – removal of microplastics from wastewater effluent with advanced wastewater treatment technologies. *Water Research*, 123, 401-407. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.07.005>
- Tang, S. (2025). Nonwoven Fabrics: The Giant of Micro(nano)plastic Pollution Hidden in the Corners of Life. *Environmental Science & Technology*, 59(23). <https://doi.org/10.1021/acs.est.5c04448>
- Tembo, M. and Mwanza, B. (2024). An assessment of the factors causing food waste along the vegetable supply chain at soweto market in Lusaka. *AJOCS*, 5(4), 221-232. <https://doi.org/10.59413/ajocs/v5.i.4.4>
- Tihomirova, K. (2019). Management of wastewater from landfill of inorganic fiberglass. *Agronomy Research*, 17(1). <https://doi.org/10.15159/AR.19.016>
- Wang, J., Guo, X., & Xue, J. (2021). Biofilm-developed microplastics as vectors of pollutants in aquatic environments. *Environmental Science & Technology*. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c04466>
- Wicaksono, P., Hikmah, Y., & Ilmiawani, R. (2023). Productivity and global value chains: a tale from the Indonesian automobile sector. *Economies*, 11(10), 262. <https://doi.org/10.3390/economies11100262>
- Widyastuti, S., Abidin, A., Hikmaturohmi, H., Ilhami, B., Kurniawan, N., Jupri, A., ... & Prasedya, E. (2023). Microplastic contamination in different marine species of Bintaro fish market, Indonesia. *Sustainability*, 15(12), 9836. <https://doi.org/10.3390/su15129836>
- World Health Organization. (2022). Guidelines for Drinking-water Quality: Fourth Edition Incorporating the First and Second Addenda. World Health Organization
- Xie, Z. (2024). Progress of dye wastewater treatment methods. *wjese*. <https://doi.org/10.57237/j.wjese.2024.02.002>
- Xu, Y., Chan, F., He, J., Johnson, M., Gibbins, C., Kay, P., ... & Zhu, Y. (2020). A critical review of microplastic pollution in urban freshwater environments and legislative progress in China: recommendations and insights. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 51(22), 2637-2680. <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1801308>