

Efektivitas Biofiltrasi Untuk Pengolahan Air Limbah Domestik di Indonesia

Husna Muizzati Shabrina

Universitas Pembangunan Nasional Veteran Yogyakarta, Indonesia

Email: husna.muizzati@upnyk.ac.id

Abstrak

Pengolahan air limbah domestik di Indonesia masih menghadapi tantangan karena rendahnya cakupan sistem pengolahan terpusat, sehingga diperlukan teknologi terdesentralisasi yang sederhana dan efektif. Salah satu alternatif yang banyak dikaji adalah biofilter, yang bekerja dengan memanfaatkan biofilm mikroorganisme pada media berpori untuk mendegradasi polutan organik dan melakukan nitrifikasi amonia. Penelitian ini bertujuan untuk mereview berbagai penelitian periode 2015–2025 yang mengkaji penerapan biofilter skala laboratorium, komunal, dan industri di Indonesia dengan variasi media seperti batu apung, kerikil, karang jahe, sarang tawon, bioball, dan plastik PET daur ulang. Hasil telaah menunjukkan bahwa biofilter mampu menurunkan BOD₅, COD, dan TSS dengan efisiensi rata-rata 70–90%, serta menurunkan amoniak hingga >80% sehingga efluen memenuhi baku mutu Permen LHK No. 68/2016. Sistem biofilter kombinasi anaerob–aerob dilaporkan memberikan kinerja paling stabil, karena tahap anaerob mengurangi beban organik dan lumpur, sedangkan tahap aerob menyelesaikan oksidasi dan nitrifikasi. Faktor-faktor yang berpengaruh terhadap kinerja meliputi luas permukaan media, waktu tinggal hidrolik (10–36 jam), kadar oksigen terlarut, pH, dan suhu operasi.

Kata kunci: biofilter, air limbah domestik, anaerob–aerob, Indonesia

Abstract

Domestic wastewater treatment in Indonesia still faces challenges due to the low coverage of centralized treatment systems, so simple and effective decentralized technology is needed. One of the most studied alternatives is the biofilter, which works by utilizing microorganism biofilms in porous media to degrade organic pollutants and nitrify ammonia. This study aims to review various studies for the period 2015–2025 that examine the application of laboratory, communal, and industrial scale biofilters in Indonesia with a variety of media such as pumice stones, gravel, ginger corals, wasp nests, bioballs, and recycled PET plastic. The results of the study showed that the biofilter was able to reduce BOD₅, COD, and TSS with an average efficiency of 70–90%, as well as reduce ammonia by up to >80% so that the effluent met the quality standards of the Minister of Environment and Forestry Regulation No. 68/2016. Anaerobic–aerobic combination biofilter systems are reported to provide the most stable performance, as the anaerobic stage reduces organic loads and sludge, while the aerobic stage completes oxidation and nitrification. Factors that affect performance include media surface area, hydraulic dwell time (10–36 hours), dissolved oxygen levels, pH, and operating temperature.

Keywords: biofilter, domestic wastewater, anaerobic–aerobic, Indonesia

*Correspondence Author: Husna Muizzati Shabrina
Email: husna.muizzati@upnyk.ac.id



PENDAHULUAN

Air limbah domestik merupakan sisa buangan kegiatan manusia pada permukiman, ataupun kegiatan komersil seperti pusat perniagaan, perhotelan, perkantoran yang berwujud cair (Adani, 2022; Fatziaty, 2024; Sembiring, 2023). Terdapat dua macam air limbah domestik yaitu yang berasal dari kegiatan kakus (*black water*) dan non-kakus (*grey water*). Di Indonesia, air limbah domestik kebanyakan tidak melalui skema pengolahan dan langsung dibuang ke badan air terdekat seperti sungai melalui perpipaan ataupun drainase (Mende et al., 2015; Rahmanissa & Slamet, 2017; Yudo & Said, 2017). Padahal, air limbah tersebut memiliki potensi mencemari badan air maupun air tanah karena kualitasnya yang belum memenuhi standar. Kualitas air limbah di berbagai daerah di Indonesia sangat bervariasi, namun umumnya

memiliki kadar Chemical Oxygen Demand (COD), minyak dan lemak, amonia, serta total koliform yang tinggi (Bakkara & Purnomo, 2022)

Pengolahan air limbah domestik dapat melalui satu atau beberapa unit pengolahan yang biasanya terbagi menjadi dua tipe: pengolahan setempat dan pengolahan terpusat. Pengolahan setempat umumnya dilakukan menggunakan unit tangki septik yang ditanam di bawah permukaan tanah, sedangkan pengolahan setempat dapat menggunakan beberapa unit pengolahan secara berurutan. Di beberapa kota, seperti Cimahi, telah dibuat IPAL domestik komunal sebagai pengolahan setempat yang umumnya melayani sekitar 10 – 50 rumah, dan ada pula yang melayani lebih dari 100 sambungan rumah (Sururi et al., 2023). Namun, sistem pengolahan terpusat yang menangani *black water* dan *grey water* baru mencakup hanya sekitar 1% rumah tangga secara nasional (Widyarani et al., 2022)

Air limbah domestik yang telah diolah perlu mencapai kualitas yang diharapkan, yaitu memenuhi baku mutu kualitas air limbah domestik sesuai dengan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 68 Tahun 2016. Di Indonesia, salah satu permasalahan dalam pengelolaan air limbah domestik di Indonesia, salah satunya dari permukiman, adalah fasilitas pengolahan air limbah yang belum memenuhi standar teknis yang ditetapkan (Yudo & Said, 2017)

Salah satu unit pengolahan air limbah domestik yang dikenal luas adalah biofilter. Biofilter memanfaatkan kemampuan mikroorganisme yang tumbuh melekat dalam suatu media untuk menyisihkan bahan pencemar terutama kontaminan organik dalam air limbah. Biofilter dapat digunakan sebagai substitusi unit tangki septik maupun sebagai salah satu unit dalam rangkaian Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) Domestik dalam skema pengolahan terpusat. Biofilter dapat menjadi salah satu unit dalam instalasi pengolahan air limbah domestik di Indonesia untuk air limbah domestik dengan tingkat pencemaran rendah hingga tinggi (Bakkara & Purnomo, 2022).

Beberapa penelitian terdahulu telah menyoroti efektivitas biofilter dalam pengolahan air limbah domestik, misalnya Sururi et al. (2023) yang mengevaluasi kinerja sistem biofilter anaerob terdesentralisasi dan menemukan bahwa penurunan COD dan amonia belum memenuhi standar, menunjukkan keterbatasan dari sisi variasi media dan konfigurasi pengolahan. Sementara itu, Said et al. (2024) membuktikan bahwa penggunaan media plastik honeycomb dalam biofilter anaerob-aerob mampu meningkatkan efisiensi penyisihan BOD, COD, TSS, amonia, dan koliform secara signifikan, tetapi penelitian ini masih kurang menguji dinamika beban dan kondisi operasional nyata.

Studi mengenai evaluasi pemanfaatan biofilter dalam mengurangi kontaminan dalam air limbah domestik di Indonesia telah banyak dilakukan, baik dalam skala laboratorium maupun skala lapangan. Namun dalam keberjalanannya, banyak aspek yang perlu diperhatikan karena adanya beragam kriteria pengolahan dalam biofilter seperti media yang digunakan dan kualitas air limbah domestik yang diolah. Oleh karena itu, studi literatur ini bertujuan untuk mengkaji sistem pengolahan air limbah domestik menggunakan biofilter di Indonesia dan aspek-aspek yang mempengaruhi efektivitas pengolahan tersebut. Manfaat penelitian berupa rekomendasi desain pengolahan air limbah domestik yang lebih optimal, memenuhi baku mutu sesuai Permen LHK No. 68/2016, serta bermanfaat dalam mendukung perbaikan kualitas lingkungan dan penguatan kebijakan sanitasi domestik di Indonesia.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode studi pustaka. Data-data dikumpulkan dari studi terdahulu yang terpublikasi pada web pencari artikel ilmiah. Kata kunci yang digunakan yaitu *biofilter*, *air limbah domestik*, *Indonesia*, *biofilter aerob*, *biofilter anaerob* pada kurun waktu tahun 2015 hingga 2025. Pengecualian dilakukan pada studi yang memuat perancangan IPAL Domestik. Data yang diperoleh kemudian disintesis berdasarkan ruang lingkup review dengan membagi ke dalam beberapa parameter seperti tipe biofilter, media yang digunakan, dan ruang lingkup studi terdahulu.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Prinsip Dasar Biofiltrasi

Biofilter bekerja dengan cara mengalirkan air limbah melalui media berpori yang ditempati biofilm mikroorganisme. Biofilm merupakan lapisan tipis yang terbentuk oleh pertumbuhan mikroba di permukaan media dalam biofilter, sehingga pencemar dapat melewati celah di antaranya dan berkontak dengan lapisan biofilm. Komunitas mikroba pada biofilter terbagi dengan kedalaman lapisan filter, dengan komunitas mikroba yang tumbuh lebih cepat dan kurang spesifik akan memenuhi lapisan atas sedangkan komunitas yang lebih spesifik mengisi lapisan bawah (Mulyadi et al., 2024). Polutan organik didegradasi menjadi CO₂, H₂O, dan biomassa baru, sementara amoniak dioksidasi melalui proses nitrifikasi menjadi nitrit dan nitrat. Efisiensi proses dipengaruhi oleh luas permukaan media, oksigen terlarut, waktu tinggal, serta kondisi pH dan suhu.

Pencemar organik yang terkandung dalam air limbah domestik dapat tersisihkan pada biofilter dengan adanya biofilm.

Proses Biofilter

Reaktor biofilter yang digunakan dalam proses biofiltrasi dengan teknik modifikasi yang beragam, seperti biofilter dengan submerged bed, trickling filter, dan rotating disks (Mulyadi, et al., 2024). Sedangkan secara proses, biofilter umumnya di dibagi menjadi dua jenis utama berdasarkan kebutuhan oksigen yaitu biofilter aerob dan anaerob. Biofilter aerob memerlukan aliran oksigen berjalan dengan baik agar pengolahan oleh mikroba berlangsung dengan baik, sedangkan biofilter anaerob harus menghindari adanya oksigen yang masuk ke dalam sistem pengolahan. Biofilter aerob dan anaerob banyak pula digunakan secara berurutan dalam skema pengolahan terpusat untuk mendapatkan keuntungan dari kedua jenis biofilter tersebut. Kelebihan dan kekurangan kedua tipe biofilter adalah sebagai berikut (Azmi et al., 2019; Pachaiappan et al., 2022; Zieliński & Kazimierowicz, J. Dębowski, 2023).

Biofilter Aerob

Kelebihan

- 1) Umumnya menghasilkan kualitas efluen tinggi untuk senyawa organik
- 2) Efektif mengurangi TSS dan menghasilkan efluen lebih jernih
- 3) Jika DO terjaga ($> \sim 2$ mg/L) dan HRT cukup (sering 36 jam), nitrifikasi berjalan baik

Kekurangan

- 1) Membutuhkan suplai oksigen (aerasi) sehingga konsumsi energi relatif tinggi;
- 2) Rentan terhadap turbulensi / erosi biofilm bila aerasi berlebihan; sehingga perlu pemeliharaan untuk mencegah clogging
- 3) Produksi lumpur (excess sludge) relatif lebih tinggi dibanding sistem anaerobik

Biofilter Anaerob**Kelebihan**

- 1) Lebih hemat energi (tidak perlu aerasi)
- 2) Tahan pada laju beban organik tinggi
- 3) Produksi lumpur kecil → biaya penanganan lumpur rendah; potensi operasi ekonomi untuk skala besar

Kekurangan

- 1) Proses lebih lambat untuk beberapa polutan; performa untuk senyawa tertentu
- 2) Untuk mencapai standar efluen (khususnya $\text{NH}_4\text{-N}$ dan patogen), sering perlu unit aerobik tambahan
- 3) Sensitif terhadap suhu (kurang cocok di iklim sangat dingin) dan terkadang lebih sulit memulai (start-up) karena komunitas mikroba anaerob memerlukan waktu adaptasi.

Efektivitas Reaktor Biofilter Di Indonesia

Pengolahan air limbah domestik dengan biofilter di Indonesia telah terbukti mampu memberikan hasil yang signifikan. Dari berbagai penelitian, rata-rata biofilter mampu menurunkan beban organik, yang ditunjukkan dengan penurunan nilai COD dan BOD sebesar 70–90%. Artinya, sebagian besar bahan pencemar organik dapat terurai ketika air limbah melewati lapisan media yang ditumbuhi mikroorganisme. Media sintetis seperti plastik sarang tawon atau bioball biasanya memberikan hasil yang lebih stabil, sedangkan media lokal seperti kerikil, batu apung, atau bambu tetap menjanjikan karena murah dan mudah didapat. Rangkuman studi biofilter di Indonesia pada tahun 2015 hingga 2025 ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Efektivitas Biofiltrasi untuk Pengolahan Air Limbah Domestik di Indonesia

No.	Sumber air limbah domestik, Lokasi	Jenis Media	Konfigurasi/ Skala	Parameter Utama	Hasil	Sumber
1.		Plastik sarang tawon (MPST) + kerikil	Upflow aerobik biofilter (laboratorium)	COD, $\text{NH}_4\text{-N}$, TSS	HRT 24 jam: COD 71–94% (rata-rata 84%); $\text{NH}_4\text{-N}$ rata-rata 89% (variasi aerasi); TSS 94% (rata-rata). HRT 36 jam menjamin $\text{NH}_4\text{-N}$ kurang dari baku mutu.	(Azmi et al., 2019)
2.	Permukiman, Cimahi	Batu apung, kerikil,	Sistem biofilter anaerob-aerob terintegrasi dalam	COD, amonia	Tidak efektif untuk mengurangi COD dan amonia karena kriteria	(Sururi et al., 2023)

No.	Sumber air limbah domestik, Lokasi	Jenis Media	Konfigurasi/ Skala	Parameter Utama	Hasil	Sumber
		ijuk, dan bioball digunakan sebagai media tumbuh biofilm. Susunan berlapis: lapisan kasar di bawah, media berpori halus di atas	unit pengolahan komunal. Skala lapangan (komunal)		desain yang tidak terpenuhi	
3.	Kawasan kuliner (rumah makan) di Alun-Alun Kabupaten Cilacap, termasuk air cuci, sisa olahan makanan, sedikit limbah toilet (<i>grey water</i> dominan).	Batu apung, kerikil, cangkang kerang, dan kain kassa disusun berlapis dari bawah ke atas.	Biofilter anaerobik, skala laboratorium/eksperimental. Menggunakan dua reaktor 5 liter yang dilengkapi sekat dan media berlapis.	BODs (Biochemical Oxygen Demand), TSS (Total Suspended Solids).	BOD: hingga 73,54% pada reaktor I pada waktu tinggal 6 jam; penyisihan terendah 57,68% (reaktor II, 0 jam). - Penyisihan TSS: hingga 81,39% pada reaktor I pada waktu tinggal 8 jam.	(Ayu Pramita & Eka Dyah Puspita, 2019)
4.	Permukiman, Kota Bengkulu	Karang jahe (coral chip)	Biofilter kombinasi anaerob-aerob, skala laboratorium	Amoniak ($\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$)	Amoniak rata-rata turun menjadi 0,07 mg/L (efisiensi 92,84%, $p=0,000 \rightarrow$ signifikan).	(Saputra et al., 2024)
5	Permukiman, Kota Malang	Batu apung (pumice) berdiameter 3–5 cm	Biofilter aerobik aliran ke atas (upflow), skala laboratorium.	BOD dan TSS	Penyisihan BOD: 18% (2,5 jam), 35,8% (6,5 jam), 51,8% (10,5 jam). - Penyisihan TSS: 52,9% (2,5 jam), 67,8% (6,5 jam), 86,5% (10,5 jam).	(Siswanti et al., 2023)
6.	Universitas, Kota Padang	Bioball berbahan limbah plastik PET dengan variasi ketebalan	Biofilter anaerobik dengan sistem kontinu, skala laboratorium.	BOD dan TSS	Efisiensi BOD: 75,18% (10 cm), 79,56% (15 cm), 84,67% (20 cm) $\rightarrow$ konsentrasi akhir 21 mg/L (sudah memenuhi baku mutu). - Efisiensi TSS: 74,16%	(Riyandini et al., 2025)

No.	Sumber air limbah domestik, Lokasi	Jenis Media	Konfigurasi/ Skala	Parameter Utama	Hasil	Sumber
		media 10 cm, 15 cm, dan 20 cm.			(10 cm), 78,33% (15 cm), 80,83% (20 cm) → konsentrasi akhir 23 mg/L (memenuhi baku mutu).	
7.	Permukiman, Kota Yogyakarta	Batu berpori	Sistem biofilter anaerobik dua tahap (Biofilter I dan II) dilanjutkan dengan tertiary treatment hidroponik	TDS, TSS, pH, COD, BOD, Fosfat (PO_4^{3-}), Nitrat (NO_3^-),	Penurunan TSS: dari 174,17 mg/L → 24,17 mg/L (efisiensi 86%). - COD: turun 49–63% menjadi 14–15 mg/L. - BOD: turun 30–59% menjadi ±4 mg/L. - Fosfat: turun hingga 76,13% pada sistem hidroponik dengan tanaman kangkung. - Nitrat: mengalami kenaikan (dari 0,34 mg/L → 6–9 mg/L) akibat proses nitrifikasi pada biofilter.	(Gultom, 2019)
8.	Limbah domestik PT X	Media sarang tawon	biofilter kombinasi anaerob–aerob, skala industri (lapangan),	pH, BOD ₅ , COD, TSS, minyak & lemak, $\text{NH}_3\text{-N}$, Total Coliform.	- BOD ₅ : turun menjadi <20,3 mg/L (efisiensi ±71%, memenuhi baku mutu). - COD: turun menjadi 40 mg/L (efisiensi ±78%). - TSS: turun menjadi <18 mg/L (efisiensi 70%). - $\text{NH}_3\text{-N}$: turun menjadi 0,81 mg/L (efisiensi 87,2%). - Minyak & Lemak: turun menjadi 0,459 mg/L (efisiensi 77%). - Total Coliform: turun menjadi 430/100 mL (efisiensi 82,1%). Semua parameter memenuhi baku mutu Permen LHK No. 68/2016.	(Adinda Rahmatanti & Yayok Suryo Purnomo, 2024)

Seperti dilihat dalam Tabel 1, biofilter juga efektif menurunkan padatan tersuspensi (TSS) hingga 85–98%. Hal ini terjadi karena media berfungsi ganda: menjadi tempat melekatnya biofilm sekaligus menyaring partikel kasar. Oleh sebab itu, air hasil olahan dari unit biofilter biasanya terlihat lebih jernih dibandingkan sebelum pengolahan. Untuk senyawa amonia ($\text{NH}_4\text{-N}$), hasilnya juga cukup baik, dengan efisiensi 80–99% tergantung kondisi operasional. Amonia dapat berkurang secara optimal bila ada cukup oksigen terlarut dan waktu

tinggal (HRT) yang cukup, umumnya 24–36 jam. Bila waktu tinggal lebih singkat atau oksigen kurang, penyisihan amonia biasanya tidak maksimal. Biofilter juga memberi kontribusi dalam mengurangi jumlah bakteri patogen seperti coliform, meskipun hasilnya sering kali masih memerlukan disinfeksi tambahan agar benar-benar aman sebelum dilepas ke lingkungan.

Parameter operasional seperti waktu tinggal hidrolis (HRT), suplai oksigen, pH, dan suhu sangat menentukan keberhasilan sistem. HRT ≥ 10 –36 jam umumnya dibutuhkan untuk mencapai penurunan BOD, COD, dan amoniak yang signifikan. Selain itu, integrasi biofilter dengan unit tambahan seperti hidroponik, klorinasi, atau constructed wetland dapat meningkatkan kualitas efluen terutama untuk penyisihan nutrisi dan mikroorganisme patogen.

Secara umum, hasil penelitian di Indonesia menunjukkan bahwa dengan pengoperasian yang tepat, sistem biofilter dapat memenuhi baku mutu air limbah domestik yang ditetapkan pemerintah. Kombinasi media seperti plastik sarang tawon dengan kerikil atau batu apung sering menghasilkan performa terbaik. Tantangannya terletak pada pemeliharaan, misalnya menghindari penyumbatan media, serta menjaga suplai oksigen agar proses biologis berjalan optimal. Dengan keunggulan berupa biaya murah, desain sederhana, dan efektivitas tinggi, biofilter menjadi salah satu teknologi yang sangat potensial untuk dikembangkan, baik pada skala rumah tangga maupun komunal di kawasan padat penduduk maupun pedesaan.

KESIMPULAN

Hasil kajian berbagai penelitian di Indonesia selama periode 2015–2025 menunjukkan bahwa biofilter merupakan salah satu teknologi pengolahan air limbah domestik yang efektif dan aplikatif, baik pada skala laboratorium, komunal, maupun industri. Secara umum, biofilter mampu menurunkan BOD₅, COD, TSS, dan amoniak dengan efisiensi rata-rata 70–90%, sehingga kualitas efluen dapat memenuhi baku mutu Permen LHK No. 68/2016. Variasi media yang digunakan, seperti sarang tawon, batu apung, kerikil, karang jahe, bioball, dan media plastik PET daur ulang, terbukti memengaruhi luas permukaan biofilm dan kinerja penyisihan. Media dengan porositas tinggi dan luas permukaan besar memberikan hasil yang lebih baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Adani, D. F. (2022). *Pemantauan Air Limbah Domestik PT Berlian Manyar Sejahtera Semester 2 Tahun 2018–2021*. UNIVERSITAS AIRLANGGA.
- Adinda Rahmatanti, & Yayok Suryo Purnomo. (2024). Pemanfaatan Air Limbah Domestik PT. X Kota Surabaya sebagai Penyiraman Ruang Terbuka Hijau. *INSOLOGI: Jurnal Sains dan Teknologi*, 3(1), 1–9. <https://doi.org/10.55123/insologi.v3i1.2849>
- Ayu Pramita, & Eka Dyah Puspita. (2019). Penurunan Biochemical Oxygen Demand (Bod) Dan Total Suspended Solids (Tss) Pada Pengolahan Limbah Cair Domestik Dengan Proses Anaerobik Biofilter. *Journal of Research and Technology*, 5(1), 21–29. <https://doi.org/10.55732/jrt.v5i1.443>
- Azmi, K. N., Danumihardja, I. G., & Said, N. I. (2019). Aplikasi Teknologi Pengolahan Air Limbah Domestik Menggunakan Kombinasi Biofilter Aerobik Media Plastik Sarang Tawon Dan Biofilter Media Kerikil Dengan Aliran Ke Atas. *Jurnal Air Indonesia*, 10(2). <https://doi.org/10.29122/jai.v10i2.3760>
- Bakkara, C. G., & Purnomo, A. (2022). Kajian Instalasi Pengolahan Air Limbah Domestik Terpusat di Indonesia. *Jurnal Teknik ITS*, 11(3).

- <https://doi.org/10.12962/j23373539.v11i3.90486>
- Fatziaty, D. (2024). *Perencanaan Desain Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) Pada Hotel Lading Banda Aceh*. UIN Ar-Raniry Fakultas Sains dan Teknologi.
- Gultom, T. (2019). Penerapan Hibrid Sistem Biofilter dan Hidroponik Sebagai Alternatif Pengolahan Limbah Pemukiman Low Income People. *SAINTEK: Jurnal ilmiah Sains dan Teknologi Industri*, 3(2), 70. <https://doi.org/10.32524/sainstek.v3i2.599>
- Mende, J. C. C., Kumurur, V. A., & Moniaga, I. L. (2015). Kajian Sistem Pengelolaan Air Limbah Pada Permukiman Di Kawasan Sekitar Danau Tondano (Studi Kasus: Kecamatan Remboken Kabupaten Minahasa). *Sabua: Jurnal Lingkungan Binaan dan Arsitektur*, 7(1), 395–406.
- Muliyadi, M., Purwanto, P., Sumiyati, S., Hadiyanto, H., Sudarno, S., Budiyono, B., & Warsito, B. (2024). Bacterial community dynamics and pollutant removal mechanisms in biofilters: A literature review. *Environmental Health Engineering and Management*, 11(4), 477–492. <https://doi.org/10.34172/EHEM.2024.47>
- Pachaiappan, R., Cornejo-Ponce, L., Rajendran, R., Manavalan, K., Femilaa Rajan, V., & Awad, F. (2022). A review on biofiltration techniques: recent advancements in the removal of volatile organic compounds and heavy metals in the treatment of polluted water. *Bioengineered*, 13(4), 8432–8477. <https://doi.org/10.1080/21655979.2022.2050538>
- Rahmanissa, A., & Slamet, A. (2017). Perencanaan Sistem Penyaluran dan Pengolahan Air Limbah Domestik Kecamatan Semarang Barat Kota Semarang. *Jurnal Teknik ITS*, 6(2), 147–151.
- Riyandini, V. L., Sawir, H., & Rahmadhani, A. (2025). Efektifitas Limbah Poly Ethylene Terephthalate (PET) sebagai Media Biofilter dalam Menyisihkan BOD danTSS pada Limbah Cair Domestik. *Jurnal Sains dan Teknologi Keilmuan dan Aplikasi Teknologi Industri*, 25(1), 176–183.
- Saputra, M. A., Yusmidiarti, Y., & Mualim, M. (2024). Efektivitas Karang Jahe (Coral Chip) Dalam Penurunan Amoniak, Suhu, Dan pH Pada Limbah Cair Domestik Dengan Metode Biofilter Anaerob-Aerob dengan Media Karang Jahe. *Sulolipu: Media Komunikasi Sivitas Akademika dan Masyarakat*, 24(2), 202–210. <https://doi.org/10.32382/sulo.v24i2.808>
- Sembiring, S. (2023). Potensi Pemanfaatan Daur Ulang Air Limbah Domestik dan Industri untuk Sumber Air Baku di Kota Batam. *Jurnal Rekayasa Teknik Sipil dan Lingkungan-CENTECH*, 4(1), 54–66.
- Siswanti, Y. D., Ratna, C. D., & Setyobudiarso, H. (2023). Environmental Pollution Journal. *Environmental Pollution Journal*, 5(2), 257–264.
- Sururi, M. R., Dirgawati, M., Wiliana, W., Fadlurrohman, F., Hardika, & Widiyati, N. (2023). Performance evaluation of domestic waste water treatment system in urban Indonesia. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 8.
- Widyarani, Wulan, D. R., Hamidah, U., Komarulzaman, A., Rosmalina, R. T., & Sintawardani, N. (2022). Domestic wastewater in Indonesia: generation, characteristics and treatment. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(22), 32397–32414. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19057-6>
- Yudo, S., & Said, N. I. (2017). Kebijakan dan Strategi Pengelolaan Air Limbah Domestik di Indonesia. *Jurnal Rekayasa Lingkungan*, 10(2), 58–75.

Zieliński, M., & Kazimierowicz, J. Dębowski, M. (2023). Advantages and limitations of anaerobic wastewater treatment—technological basics, development directions, and technological innovations. *Energies*, 16(1), 83.



© 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY SA) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).