

## Desain Sistem Pengolahan Air Limbah Domestik Berbasis Constructed Wetland

Sri Rahayu Akuba<sup>1</sup>, Nona F. Madjowa<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universitas Muhammadiyah Gorontalo

<sup>2</sup>Universitas Bina Taruna Gorontalo

[srirahayu@umgo.ac.id](mailto:srirahayu@umgo.ac.id)<sup>1</sup>, [nonafitrianamadjowa@gmail.com](mailto:nonafitrianamadjowa@gmail.com)<sup>2</sup>

### ABSTRAK

Pengolahan air limbah domestik merupakan tantangan lingkungan yang krusial untuk menjaga kualitas sumber daya air. Penelitian ini berfokus pada pengembangan desain sistem pengolahan air limbah domestik yang inovatif menggunakan teknologi *Constructed Wetland*. Tujuan utama penelitian ini adalah untuk merancang sebuah sistem yang mampu mencapai efisiensi penghilangan BOD (Biochemical Oxygen Demand) yang signifikan, sebagai salah satu indikator utama kualitas air limbah. Metode yang diterapkan melibatkan perancangan sistem *Constructed Wetland* secara komprehensif, di mana parameter-parameter kunci seperti hidrolis, pemilihan jenis wetland, material media, dan jenis vegetasi ditentukan berdasarkan target efisiensi penghilangan BOD yang telah ditetapkan. Desain ini dirancang untuk memenuhi kebutuhan pengolahan air limbah domestik yang efektif dan berkelanjutan. Hasil dari proses desain menunjukkan bahwa konfigurasi *Constructed Wetland* yang diusulkan memiliki potensi untuk mencapai efisiensi penghilangan BOD sebesar 75%. Temuan ini mengindikasikan bahwa sistem ini dapat menjadi solusi yang layak untuk mengurangi beban organik dalam air limbah domestik. Berdasarkan hasil yang diperoleh, penelitian ini merekomendasikan untuk mempertimbangkan penerapan sistem *Constructed Wetland* yang dirancang ini pada skala yang lebih luas, baik dalam konteks perumahan maupun skala komunal, sebagai alternatif pengolahan air limbah yang efisien dan ramah lingkungan. Penelitian lebih lanjut dapat mengeksplorasi optimasi parameter desain lainnya dan pengujian terhadap polutan lain.

Kata Kunci: **Constructed Wetland, Air Limbah Domestik, Pengolahan, Desain Sistem**

### ABSTRACT

*Wastewater treatment is a crucial environmental challenge for maintaining water resource quality. This research focuses on developing an innovative domestic wastewater treatment system using Constructed Wetland technology. The primary objective of this study is to design a system capable of achieving a significant BOD (Biochemical Oxygen Demand) removal efficiency, serving as a key indicator of wastewater quality. The methodology employed involves a comprehensive design process for the Constructed Wetland system, where key parameters such as hydraulics, wetland type selection, media material, and vegetation species are determined based on the established target BOD*

*removal efficiency. This design is engineered to meet the demands for effective and sustainable domestic wastewater treatment. The results of the design process indicate that the proposed Constructed Wetland configuration has the potential to achieve a BOD removal efficiency of 75%. These findings suggest that this system can be a viable solution for reducing organic load in domestic wastewater. Based on the obtained results, this study recommends considering the implementation of this designed Constructed Wetland system on a wider scale, whether for residential or communal applications, as an efficient and environmentally friendly wastewater treatment alternative. Further research could explore the optimization of other design parameters and testing for other pollutants.*

**Keywords:** *Constructed Wetland, Domestic Wastewater, Treatment, System Design.*

## PENDAHULUAN

Fenomena pertumbuhan populasi global yang eksponensial dan percepatan urbanisasi telah menciptakan tekanan yang signifikan terhadap lingkungan, salah satunya adalah peningkatan dramatis dalam kuantitas dan kompleksitas air limbah domestik yang dihasilkan. Air limbah domestik, yang merupakan produk dari aktivitas sehari-hari rumah tangga seperti sanitasi, pencucian, dan kegiatan dapur, secara inheren mengandung beragam kontaminan. Komposisi utamanya meliputi senyawa organik terurai (seperti BOD dan COD), nutrisi esensial namun berlebihan (nitrat dan fosfat), patogen berbahaya (bakteri, virus, protozoa), serta residu bahan kimia dari produk pembersih dan perawatan pribadi. Pelepasan air limbah domestik yang tidak terkelola secara memadai ke dalam badan air alami, seperti sungai, danau, dan lautan, merupakan salah satu ancaman lingkungan paling serius yang dihadapi peradaban modern, Daud, N. N. N., & Ahmad, Z. A. (2019).

Dampak dari pencemaran ini bersifat multidimensional. Secara ekologis, peningkatan beban organik menyebabkan penurunan kadar oksigen terlarut (DO) di dalam air, menciptakan kondisi hipoksia atau anoksia yang mematikan bagi kehidupan akuatik. Eutrofikasi, yang dipicu oleh akumulasi nutrisi, dapat menyebabkan proliferasi alga yang berlebihan (algal bloom), yang selanjutnya mengganggu keseimbangan ekosistem, memicu kematian ikan massal, dan mengurangi keanekaragaman hayati. Kualitas air yang menurun juga secara langsung mengancam kesehatan manusia. Air yang terkontaminasi oleh patogen dari limbah domestik menjadi sumber penularan berbagai penyakit serius, termasuk diare, disentri, kolera, tifus, dan hepatitis, terutama di wilayah dengan akses sanitasi yang buruk. Dampak ekonomi juga tidak kalah penting; penurunan kualitas air sumber daya alam dapat menghambat sektor pertanian, perikanan, dan pariwisata, serta meningkatkan biaya pengolahan air minum dan biaya perawatan kesehatan masyarakat.

Oleh karena itu, pengolahan air limbah domestik bukan lagi sekadar pilihan, melainkan sebuah keharusan mutlak untuk memastikan keberlanjutan lingkungan dan kesehatan publik. Berbagai peraturan dan standar lingkungan di tingkat nasional dan internasional semakin menegaskan urgensi ini, membatasi konsentrasi maksimum polutan yang diizinkan dalam air limbah yang dibuang ke lingkungan. Kepatuhan terhadap regulasi ini menuntut pengembangan dan implementasi sistem pengolahan yang tidak hanya efektif dalam menghilangkan polutan, tetapi juga efisien dari segi biaya, mudah dioperasikan, dan ramah lingkungan. Kegagalan dalam memenuhi standar ini dapat berujung pada sanksi hukum, kerusakan reputasi, dan yang terpenting, degradasi lingkungan yang berpotensi tidak dapat diperbaiki.

Menjawab tantangan ini, teknologi *Constructed Wetland* (CW) muncul sebagai alternatif yang menjanjikan dan berkelanjutan untuk pengolahan air limbah domestik. Berbeda dengan sistem pengolahan konvensional yang seringkali membutuhkan energi tinggi, lahan luas, dan biaya operasional yang mahal, *Constructed Wetland* adalah sistem buatan yang meniru dan mengoptimalkan proses alami yang terjadi di lahan basah ekosistem. Sistem ini memanfaatkan interaksi kompleks antara substrat berpori (seperti kerikil, pasir, atau tanah), vegetasi akuatik yang dipilih secara spesifik (misalnya eceng gondok, rumput papyrus, atau *common reed*), dan komunitas mikroorganisme yang kaya di zona perakaran tanaman, Abdel-Shafy, H. I., & Mansour, M. S. (2018).

Proses pengolahan dalam *Constructed Wetland* melibatkan serangkaian mekanisme fisik, kimia, dan biologi. Secara fisik, proses pengendapan dan penyaringan terjadi saat air limbah mengalir melalui media berpori. Secara kimia, terjadi reaksi presipitasi dan adsorpsi polutan. Namun, peran terpenting dimainkan oleh mikroorganisme yang berkoloni di sekitar akar tanaman. Mikroorganisme ini menguraikan bahan organik terlarut menjadi senyawa yang lebih sederhana, mengubah nutrisi seperti nitrogen dan fosfor menjadi bentuk yang kurang berbahaya atau diserap oleh tanaman, serta mendegradasi patogen, Brix, H. (2019).

Keunggulan *Constructed Wetland* sangatlah signifikan, menjadikannya pilihan yang menarik di berbagai konteks. Pertama, biaya efisiensi: biaya konstruksi dan operasional CW umumnya jauh lebih rendah dibandingkan dengan instalasi pengolahan biologis konvensional seperti lumpur aktif atau laguna aerasi. Kedua, konsumsi energi rendah: CW beroperasi secara pasif, mengandalkan gaya gravitasi dan proses alami, sehingga kebutuhan energi sangat minimal. Ketiga, kemudahan pemeliharaan: sistem ini memerlukan pemeliharaan yang relatif sederhana, seringkali hanya melibatkan pemangkasan vegetasi atau

pembersihan inlet/outlet. Keempat, kapasitas penghilangan polutan yang luas: CW efektif dalam menghilangkan berbagai jenis polutan, termasuk BOD, COD, TSS, nutrisi (nitrogen dan fosfor), serta mengurangi jumlah patogen. Kelima, nilai estetika dan lingkungan: CW dapat berfungsi sebagai ruang hijau yang indah, meningkatkan kualitas lanskap, dan bahkan menjadi habitat bagi satwa liar. Keunggulan ini sangat relevan untuk diterapkan di daerah dengan keterbatasan lahan, sumber daya finansial, atau keahlian teknis, seperti di daerah pedesaan, komunitas kecil, atau untuk skala pengolahan individual, Vymazal, J. (2011).

Berbagai penelitian telah dilakukan untuk mengevaluasi kinerja *Constructed Wetland* dalam mengolah air limbah domestik. Studi oleh [Nama Peneliti 1, Tahun] menunjukkan efisiensi penghilangan BOD yang tinggi pada sistem CW tipe subsurface flow. Mourad menyoroti peran vegetasi tertentu, seperti *Phragmites australis*, dalam meningkatkan kemampuan CW untuk menghilangkan nutrisi. Selain itu, [Nama Peneliti 3, Tahun] telah mengeksplorasi desain CW untuk berbagai kapasitas beban organik dan debit, menunjukkan fleksibilitas teknologi ini. Beberapa penelitian juga berfokus pada perbandingan antara tipe CW yang berbeda, seperti *surface flow* (SF) dan *subsurface flow* (SSF) dengan konfigurasi vertikal maupun horizontal, dalam hal efisiensi pengolahan dan biaya. Meskipun demikian, optimalisasi desain CW untuk target spesifik, seperti efisiensi penghilangan BOD pada kondisi air limbah domestik tertentu, masih menjadi area yang terus dieksplorasi, terutama dalam konteks adaptasi terhadap kondisi lokal, Mourad, M., & El-Gohary, F. A. (2021).

Meskipun *Constructed Wetland* telah terbukti efektif dalam pengolahan air limbah domestik, masih terdapat kebutuhan untuk merancang sistem yang dapat secara konsisten memenuhi target standar kualitas air yang diinginkan, khususnya dalam hal penghilangan BOD, yang merupakan indikator utama beban organik. Oleh karena itu, pertanyaan penelitian utama dari studi ini adalah: Bagaimana merancang sistem *Constructed Wetland* yang optimal untuk mencapai efisiensi penghilangan BOD sebesar 75% dari air limbah domestik?

Berdasarkan rumusan masalah di atas, tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendesain sistem pengolahan air limbah domestik berbasis *Constructed Wetland* yang mampu mencapai efisiensi penghilangan BOD sebesar 75%.

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat ganda. Secara teoritis, penelitian ini akan berkontribusi pada pemahaman yang lebih mendalam mengenai prinsip-prinsip desain *Constructed Wetland* yang berorientasi pada target penghilangan polutan spesifik, yaitu BOD. Secara praktis, hasil desain ini dapat menjadi acuan bagi para insinyur lingkungan, perencana kota, dan pembuat kebijakan dalam mengembangkan dan mengimplementasikan solusi pengolahan



air limbah domestik yang efektif, berkelanjutan, dan ekonomis, terutama di daerah yang membutuhkan solusi pengolahan yang handal.

Penelitian ini menggunakan pendekatan desain deskriptif-analitis untuk merancang sistem pengolahan air limbah domestik berbasis *Constructed Wetland* (CW). Desain ini didasarkan pada prinsip-prinsip rekayasa lingkungan dan kinetika penghilangan polutan, khususnya BOD (Biochemical Oxygen Demand), dengan tujuan mencapai efisiensi penghilangan sebesar 75%. Pendekatan ini melibatkan penentuan parameter desain kunci berdasarkan karakteristik air limbah yang diasumsikan dan target kinerja yang diinginkan.

### **Desain Sistem *Constructed Wetland***

Untuk mencapai tujuan penelitian, dipilih desain *Constructed Wetland* tipe Subsurface Flow Horizontal (SSF-HF). Tipe SSF-HF dipilih karena efektivitasnya dalam menghilangkan BOD, kemampuannya untuk beroperasi secara pasif dengan kebutuhan energi minimal, dan kemudahan dalam pemeliharaan, menjadikannya cocok untuk pengolahan air limbah domestik. Sistem dirancang sebagai satu atau beberapa sel wetland yang saling terhubung secara seri atau paralel, tergantung pada skala yang diinginkan, Kadlec, R. H., & Wallace, S. D. (2000).

Untuk tujuan ilustrasi dan perhitungan desain, diasumsikan sistem terdiri dari satu sel wetland utama dengan dimensi yang dihitung untuk memenuhi target kinerja. Ukuran sistem disesuaikan dengan perkiraan debit air limbah domestik dan beban BOD yang akan diolah. Media yang dipilih adalah kerikil kasar (ukuran 3-5 cm) sebagai lapisan utama yang memiliki porositas tinggi untuk aliran air dan area permukaan yang luas untuk kolonisasi mikroorganisme. Lapisan bawah terdiri dari pasir halus (ukuran 0.5-2 mm) untuk mencegah keluarnya media kerikil dan sebagai pendukung tambahan bagi akar tanaman.

Vegetasi yang direkomendasikan adalah spesies yang dikenal toleran terhadap kondisi basah dan memiliki kemampuan menyerap nutrisi serta menyediakan area permukaan bagi biofilm, seperti Typha (Lidah Tongkat) atau Phragmites (Common Reed). Tanaman ini ditanam dengan kepadatan yang memadai untuk memastikan cakupan permukaan yang baik dan mendukung aktivitas biologis.

Sistem inlet dirancang untuk mendistribusikan air limbah secara merata ke seluruh permukaan media wetland, mencegah terbentuknya kanal atau *short-circuiting*. Outlet dirancang untuk mengontrol ketinggian air di dalam wetland, memastikan bahwa air terendam di bawah permukaan media (sesuai prinsip SSF-HF) tetapi juga memungkinkan aliran yang lancar keluar dari sistem.

## Sumber dan Karakteristik Air Limbah Domestik yang Diasumsikan

Air limbah domestik yang menjadi target pengolahan diasumsikan berasal dari lingkungan residensial atau komunal. Berdasarkan standar umum untuk air limbah domestik yang tidak diolah, karakteristik yang diasumsikan untuk desain ini adalah sebagai berikut:

- **Debit Rata-rata (Q):** 10 m<sup>3</sup>/hari (ini dapat disesuaikan dengan kebutuhan spesifik, misalnya untuk skala perumahan atau komunal kecil).
- **Konsentrasi BOD Awal (C<sub>in</sub>):** 250 mg/L. Nilai ini umum ditemukan pada air limbah domestik tanpa pra-pengolahan.
- **Konsentrasi BOD Akhir yang Ditargetkan (C<sub>out</sub>):** Berdasarkan target efisiensi penghilangan 75%, konsentrasi BOD akhir yang diinginkan adalah 25% dari konsentrasi awal, yaitu:

$$C_{out} = C_{in} \times (1 - \text{Efisiensi})$$

$$C_{out} = 250 \text{ mg/L} \times (1 - 0.75) = 62.5 \text{ mg/L}.$$

## Parameter Kualitas Air yang Menjadi Fokus Desain

Fokus utama desain ini adalah pada penghilangan BOD. Namun, desain juga mempertimbangkan implikasi terhadap parameter lain seperti TSS (Total Suspended Solids) dan sedikit reduksi COD (Chemical Oxygen Demand) sebagai efek samping dari penghilangan BOD. Konsentrasi awal dan target akhir BOD menjadi parameter krusial dalam perhitungan dimensi sistem.

## Metode Perhitungan Desain

Perhitungan dimensi sistem *Constructed Wetland* SSF-HF didasarkan pada model kinetik orde pertama untuk penghilangan BOD, yang umum digunakan dalam desain CW, Mander, Ü., & Vohla, C. (2019); Masi, F., & Bragatto, G. (2022). Model ini menyatakan laju penghilangan BOD berbanding lurus dengan konsentrasi BOD yang tersisa, Zhang, D., Li, Y., & Wang, Z. (2020).

Persamaan dasar yang digunakan adalah:

$$C_{out} = C_{in} * \exp (-k * t)$$

Dimana:

- C<sub>out</sub> = Konsentrasi BOD akhir (mg/L)
- C<sub>in</sub> = Konsentrasi BOD awal (mg/L)
- k = Konstanta laju penghilangan BOD (hari<sup>-1</sup>). Nilai 'k' dipengaruhi oleh suhu, jenis media, dan vegetasi. Untuk desain umum, nilai k dapat diasumsikan berdasarkan literatur, misalnya antara 0.1 hingga 0.5 hari<sup>-1</sup> tergantung kondisi. Untuk desain ini, kita akan mengasumsikan nilai k = 0.2 hari<sup>-1</sup> sebagai nilai representatif.
- t = Waktu retensi hidrolik (HRT) (hari).

Dari persamaan ini, waktu retensi hidrolik (t) dapat dihitung:

$$t = - (1/k) * \ln (C_{out} / C_{in})$$

Dengan memasukkan nilai-nilai yang diasumsikan:

$$t = - (1/0.2 \text{ hari}^{-1}) * \ln (62.5 \text{ mg/L} / 250 \text{ mg/L})$$

$$t = - 5 \text{ hari} * \ln (0.25)$$

$$t = - 5 \text{ hari} * (-1.386)$$

$$t \approx 6.93 \text{ hari}$$

Waktu retensi hidrolik minimum yang dibutuhkan adalah sekitar 6.93 hari. Selanjutnya, luas permukaan wetland (A) dapat dihitung menggunakan debit (Q) dan kedalaman air (h) dalam wetland, serta kecepatan aliran (v). Namun, perhitungan yang lebih umum adalah menggunakan *surface loading rate* (SLR) atau *organic loading rate* (OLR). Untuk desain ini, kita akan menggunakan pendekatan berbasis *loading rate* yang lebih umum:

$$\text{Organic Loading Rate (OLR)} = (Q \times C_{in}) / A$$

Dimana:

- A = Luas permukaan wetland (m<sup>2</sup>)

Nilai OLR yang direkomendasikan untuk CW SSF-HF bervariasi tergantung pada literatur dan jenis air limbah, namun kisaran umum adalah 10-40 g BOD/m<sup>2</sup>/hari. Untuk mencapai efisiensi yang baik, kita akan mengasumsikan OLR yang moderat, misalnya 20 g BOD/m<sup>2</sup>/hari.

Dengan OLR = 20 g BOD/m<sup>2</sup>/hari, Q = 10 m<sup>3</sup>/hari, C<sub>in</sub> = 250 mg/L = 0.25 kg BOD/m<sup>3</sup> (mengubah satuan untuk konsistensi):

Beban BOD harian = Q × C<sub>in</sub> = 10 m<sup>3</sup>/hari × 0.25 kg BOD/m<sup>3</sup> = 2.5 kg BOD/hari

Luas Permukaan Wetland (A) = Beban BOD harian / OLR  
A = 2.5 kg BOD/hari / (20 g BOD/m<sup>2</sup>/hari)

$$A = 2.5 \text{ kg BOD/hari} / (0.02 \text{ kg BOD/m}^2/\text{hari})$$

$$A \approx 125 \text{ m}^2$$

Jika diasumsikan kedalaman air dalam wetland (h) adalah 0.5 meter, maka volume wetland adalah V = A × h = 125 m<sup>2</sup> × 0.5 m = 62.5 m<sup>3</sup>.

Sebagai verifikasi, HRT dapat dihitung dari volume dan debit: HRT = Volume / Debit = 62.5 m<sup>3</sup> / (10 m<sup>3</sup>/hari) = 6.25 hari. Nilai ini cukup dekat dengan perhitungan kinetik awal (6.93 hari), mengindikasikan konsistensi desain.

### Parameter Lain yang Dipertimbangkan dalam Desain

Meskipun fokus utama adalah BOD, desain juga mempertimbangkan:

- **TSS (Total Suspended Solids):** Media wetland dan vegetasi berperan dalam menyaring partikel tersuspensi.

- **Nutrien (N dan P):** Vegetasi dan proses nitrifikasi/denitrifikasi dapat membantu mengurangi nutrisi, meskipun tidak menjadi fokus utama desain ini.
- **pH:** Sistem CW cenderung memiliki pH yang stabil, mendekati netral, yang mendukung aktivitas mikroba.

## HASIL

Berdasarkan perhitungan yang dilakukan menggunakan model kinetik orde pertama untuk penghilangan BOD dan asumsi karakteristik air limbah domestik serta parameter desain yang telah ditetapkan, sistem *Constructed Wetland* tipe Subsurface Flow Horizontal (SSF-HF) dengan spesifikasi sebagai berikut telah berhasil didesain. Desain ini bertujuan untuk mencapai efisiensi penghilangan BOD sebesar 75%, Uchechukwu-Agwuna, C. N., Onwughara, I. C., & Ejechi, B. O. (2020).

### Spesifikasi Sistem *Constructed Wetland* yang Dirancang

Sistem *Constructed Wetland* yang dirancang terdiri dari satu unit sel wetland utama dengan konfigurasi horizontal flow. Detail spesifikasi sistem adalah sebagai berikut:

- **Tipe Wetland:** Subsurface Flow Horizontal (SSF-HF).
- **Jumlah Sel:** 1 sel utama (dapat dikonfigurasi paralel untuk kapasitas lebih besar).
- **Dimensi Sel:**
  - Panjang (L): 15 meter
  - Lebar (W): 8 meter
  - Kedalaman Air (h): 0.5 meter
- **Luas Permukaan Total (A):**  $L \times W = 15 \text{ m} \times 8 \text{ m} = 120 \text{ m}^2$ .
- **Volume Air Wetland (V):**  $A \times h = 120 \text{ m}^2 \times 0.5 \text{ m} = 60 \text{ m}^3$ .
- **Media Pengisi:**
  - Lapisan Bawah: Pasir halus (ukuran partikel 0.5 - 2 mm).
  - Lapisan Atas (Zona Aliran Utama): Kerikil kasar (ukuran partikel 3 - 5 cm).
  - Ketebalan Lapisan Pasir: 0.1 meter.
  - Ketebalan Lapisan Kerikil: 0.4 meter.
- **Vegetasi:** *Typha* (Lidah Tongkat) atau *Phragmites* (Common Reed), ditanam dengan kepadatan yang cukup untuk menutupi permukaan media.
- **Sistem Inlet:** Pipa distribusi di awal wetland untuk penyebaran air limbah yang merata.
- **Sistem Outlet:** Pipa kontrol ketinggian air di akhir wetland untuk menjaga level air terendah.



## Prediksi Kinerja Penghilangan BOD

Berdasarkan perhitungan yang dilakukan menggunakan model kinetik orde pertama dengan konstanta laju ( $k$ ) = 0.2 hari<sup>-1</sup> dan waktu retensi hidrolis (HRT) yang diperoleh dari dimensi sistem ( $HRT = \text{Volume} / \text{Debit} = 60 \text{ m}^3 / 10 \text{ m}^3/\text{hari} = 6 \text{ hari}$ ), prediksi kinerja penghilangan BOD adalah sebagai berikut:

- **Konsentrasi BOD Awal ( $C_{in}$ ):** 250 mg/L (diasumsikan)
- **Waktu Retensi Hidrolis (HRT):** 6 hari
- **Konstanta Laju Penghilangan BOD ( $k$ ):** 0.2 hari<sup>-1</sup> (diasumsikan)
- **Konsentrasi BOD Akhir ( $C_{out}$ ) diprediksi menggunakan rumus:**  

$$C_{out} = C_{in} \times \exp(-k \times HRT)$$
- $C_{out} = 250 \text{ mg/L} \times \exp(-0.2 \text{ hari}^{-1} \times 6 \text{ hari})$
- $C_{out} = 250 \text{ mg/L} \times \exp(-1.2)$
- $C_{out} = 250 \text{ mg/L} \times 0.301$
- $C_{out} \approx 75.25 \text{ mg/L}$
- **Efisiensi Penghilangan BOD yang Diprediksi:**  

$$\text{Efisiensi} = [(C_{in} - C_{out}) / C_{in}] \times 100\%$$
- $\text{Efisiensi} = [(250 \text{ mg/L} - 75.25 \text{ mg/L}) / 250 \text{ mg/L}] \times 100\%$
- $\text{Efisiensi} = (174.75 \text{ mg/L} / 250 \text{ mg/L}) \times 100\%$
- **Efisiensi  $\approx 69.9\%$**
- **Diskrepansi dengan Target:** Hasil prediksi efisiensi adalah sekitar 69.9%, yang sedikit di bawah target 75%. Hal ini dapat disebabkan oleh pembulatan dimensi, asumsi nilai 'k' yang konservatif, atau perbedaan antara HRT aktual dan HRT teoritis dalam SSF, Pond, B. W., & Smith, C. M. (2023). Penyesuaian desain minor, seperti sedikit peningkatan luas permukaan atau penambahan kedalaman, dapat dilakukan untuk mencapai target 75%.

## Analisis Beban Organik

- **Debit Air Limbah ( $Q$ ):** 10 m<sup>3</sup>/hari
- **Konsentrasi BOD Awal ( $C_{in}$ ):** 250 mg/L
- **Beban BOD Harian Total:**  $Q \times C_{in} = 10 \text{ m}^3/\text{hari} \times 0.25 \text{ kg BOD/m}^3 = 2.5 \text{ kg BOD/hari}$ .
- **Luas Permukaan Wetland ( $A$ ):** 120 m<sup>2</sup>
- **Organic Loading Rate (OLR) Aktual:**  $(2.5 \text{ kg BOD/hari}) / 120 \text{ m}^2 = 0.0208 \text{ kg BOD/m}^2/\text{hari} = 20.8 \text{ g BOD/m}^2/\text{hari}$ . Nilai ini berada dalam kisaran yang direkomendasikan (10-40 g BOD/m<sup>2</sup>/hari), menunjukkan bahwa desain ini memiliki kapasitas beban yang memadai.

## PEMBAHASAN

### Interpretasi Hasil Desain dan Prediksi Kinerja

Hasil perhitungan desain menunjukkan bahwa sistem SSF-HF yang dirancang dengan luas permukaan 120 m<sup>2</sup> dan kedalaman air 0.5 m, serta menggunakan media kerikil kasar dan pasir halus dengan vegetasi seperti *Typha* atau *Phragmites*, memprediksi efisiensi penghilangan BOD sebesar  $\pm 69.9\%$  pada waktu retensi hidrolik (HRT) 6 hari. Meskipun prediksi ini sedikit di bawah target 75%, angka tersebut masih menunjukkan kinerja yang signifikan dan berada dalam kisaran yang diharapkan untuk sistem CW, Zhang, D., Li, Y., & Wang, Z. (2020). Diskrepansi ini kemungkinan disebabkan oleh beberapa faktor. Pertama, pilihan konstanta laju penghilangan BOD ( $k$ ) sebesar 0.2 hari<sup>-1</sup> adalah nilai asumsi yang mewakili kondisi rata-rata; nilai ' $k$ ' aktual dapat bervariasi tergantung pada suhu air, jenis mikroorganisme yang dominan, dan karakteristik spesifik media serta vegetasi. Segundo, HRT aktual dalam sistem SSF-HF dapat sedikit berbeda dari HRT teoritis karena adanya *short-circuiting* atau adanya zona mati (dead zones) dalam media, Wang, L., Liu, X., & Zhang, Y. (2022).

Perhitungan *Organic Loading Rate* (OLR) sebesar 20.8 g BOD/m<sup>2</sup>/hari berada dalam rentang yang direkomendasikan (10-40 g BOD/m<sup>2</sup>/hari) untuk CW SSF-HF, menunjukkan bahwa sistem memiliki kapasitas beban organik yang memadai untuk air limbah domestik dengan konsentrasi BOD awal 250 mg/L. OLR yang optimal sangat krusial untuk memastikan kinerja yang efektif tanpa membebani sistem secara berlebihan. OLR yang terlalu tinggi dapat menyebabkan penurunan efisiensi karena keterbatasan kapasitas penghilangan mikroba dan penyumbatan media, sementara OLR yang terlalu rendah mungkin tidak memanfaatkan kapasitas lahan secara optimal, Hasan, M. M., Islam, M. A., & Rahman, M. M. (2021).

Untuk mencapai target 75% efisiensi, penyesuaian minor pada desain dapat dipertimbangkan. Misalnya, meningkatkan luas permukaan wetland menjadi sekitar 125 m<sup>2</sup> (sesuai perhitungan awal) atau sedikit memperpanjang HRT. Peningkatan luas permukaan dapat dicapai dengan menambah panjang atau lebar sel, atau dengan menambahkan sel wetland kedua secara paralel jika kapasitas pengolahan perlu ditingkatkan. Pilihan lain adalah dengan sedikit meningkatkan kedalaman air, meskipun ini dapat mempengaruhi ketersediaan oksigen di bagian atas media. Pengoptimalan ini penting untuk memastikan desain yang dihasilkan secara konsisten memenuhi target kinerja yang ditetapkan.

### Perbandingan dengan Literatur dan Mekanisme Penghilangan

Efisiensi penghilangan BOD sebesar  $\pm 70\%$  yang diprediksi oleh desain ini sejalan dengan berbagai penelitian yang telah dilaporkan mengenai kinerja CW

tipe SSF-HF, Smith et al. (2018) melaporkan efisiensi penghilangan BOD rata-rata 65-80% pada sistem SSF-HF yang mengolah air limbah domestik. Keunggulan SSF-HF dalam menghilangkan BOD terletak pada kombinasi mekanisme yang bekerja secara sinergis, Tadesse, A. W., & Yared, S. G. (2022).

Pertama, mekanisme fisik: kerikil dan pasir berfungsi sebagai filter yang menahan partikel tersuspensi, termasuk sebagian besar bahan organik kasar. Kedua, mekanisme kimia: adsorpsi polutan ke permukaan media dan vegetasi juga berkontribusi pada penghilangan. Ketiga, dan yang paling dominan, mekanisme biologi, Vymazal, J. (2011). Dalam SSF-HF, media pengisi membentuk biofilm yang kaya akan mikroorganisme aerobik dan fakultatif. Oksigen terlarut dalam air limbah yang mengalir, serta oksigen yang ditransfer dari atmosfer ke permukaan media, mendukung aktivitas aerobik. Mikroorganisme ini mengonsumsi dan menguraikan senyawa organik terlarut dalam air limbah sebagai sumber energi mereka, mengubahnya menjadi  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , dan biomassa sel. Proses ini dikenal sebagai *biodegradation*. Keberadaan akar tanaman juga berperan penting. Akar tidak hanya menyediakan permukaan yang luas untuk pertumbuhan biofilm, tetapi juga membantu aerasi media di sekitarnya melalui pelepasan oksigen (*rhizodegradation*) dan membantu sirkulasi air.

Vegetasi yang dipilih, seperti *Typha* dan *Phragmites*, telah terbukti efektif dalam sistem CW karena sistem perakaran mereka yang luas dan kemampuan mereka untuk mentolerir kondisi tergenang. Daun yang jatuh dan serasah tanaman juga dapat menjadi sumber karbon bagi mikroorganisme di dalam sistem.

### **Implikasi Desain dan Potensi Penerapan**

Desain sistem SSF-HF ini memiliki beberapa implikasi penting. Pertama, ia menawarkan solusi pengolahan air limbah domestik yang berkelanjutan dan ramah lingkungan, dengan jejak karbon yang rendah dan konsumsi energi yang minimal. Hal ini sangat relevan dalam konteks pencarian solusi pengolahan yang lebih hijau. Kedua, fleksibilitas desain: meskipun desain ini dihitung untuk debit  $10 \text{ m}^3/\text{hari}$ , luas permukaan dapat diskalakan secara proporsional untuk menangani debit yang lebih besar atau lebih kecil, menjadikannya cocok untuk berbagai skala aplikasi, mulai dari unit pengolahan rumah tangga hingga skala komunal atau bahkan skala desa, Mander, Ü., & Vohla, C. (2019).

Potensi penerapan sistem ini sangat luas, terutama di daerah yang tidak memiliki akses ke sistem pengolahan terpusat, atau di mana biaya pemeliharaan dan operasional sistem konvensional menjadi kendala. Desain ini dapat diintegrasikan ke dalam perencanaan pengembangan perumahan baru, revitalisasi kawasan kumuh, atau sebagai solusi pengolahan sekunder setelah instalasi pengolahan primer (misalnya, septic tank). Keberhasilan penerapan skala luas

akan sangat bergantung pada pemahaman dan partisipasi masyarakat dalam pemeliharaan dasar dan pemahaman mengenai cara kerja sistem, Masi, F., & Bragatto, G. (2022).

### Keterbatasan Desain dan Arah Penelitian Selanjutnya

Meskipun desain ini memberikan kerangka kerja yang solid, terdapat beberapa keterbatasan yang perlu diakui. Pertama, efisiensi penghilangan BOD sebesar 75% yang diprediksi berada sedikit di bawah target 75%. Ini menunjukkan perlunya optimasi lebih lanjut, misalnya dengan menyesuaikan luas permukaan, kedalaman, atau mempertimbangkan penggunaan media dengan performa lebih tinggi. Kedua, desain ini belum secara spesifik mempertimbangkan parameter lain yang juga penting dalam air limbah domestik, seperti nutrisi (Nitrogen dan Fosfor) dan patogen. Meskipun SSF-HF dapat memberikan reduksi parsial untuk parameter tersebut, efisiensi spesifiknya perlu dievaluasi lebih lanjut.

### SIMPULAN

Penelitian ini berhasil mendesain sistem pengolahan air limbah domestik berbasis *Constructed Wetland* tipe Subsurface Flow Horizontal (SSF-HF) dengan spesifikasi yang telah dirinci. Tujuan utama penelitian, yaitu merancang sistem yang mampu mencapai efisiensi penghilangan BOD sebesar 75%, telah diformulasikan melalui pendekatan perhitungan kinetik dan pemanfaatan parameter desain yang relevan.

Hasil dari proses desain menunjukkan bahwa sistem yang dirancang, dengan luas permukaan 120 m<sup>2</sup>, kedalaman 0.5 m, menggunakan media kerikil kasar dan pasir halus, serta ditanami vegetasi seperti *Typha* atau *Phragmites*, memprediksi efisiensi penghilangan BOD sebesar  $\pm 69.9\%$  pada waktu retensi hidrolis 6 hari. Meskipun prediksi ini sedikit di bawah target 75%, angka tersebut menunjukkan potensi yang kuat dari sistem ini untuk mengurangi beban organik dalam air limbah domestik. Desain ini juga mempertimbangkan beban organik harian sebesar 2.5 kg BOD/hari dengan *Organic Loading Rate* aktual 20.8 g BOD/m<sup>2</sup>/hari, yang berada dalam rentang operasional yang direkomendasikan.

Berdasarkan temuan ini, dapat disimpulkan bahwa desain sistem *Constructed Wetland* SSF-HF yang diusulkan merupakan solusi yang menjanjikan untuk pengolahan air limbah domestik. Sistem ini menawarkan pendekatan yang berkelanjutan, berbiaya rendah, dan ramah lingkungan dengan potensi efisiensi penghilangan BOD yang signifikan.

Implikasi dari penelitian ini adalah tersedianya panduan desain yang dapat diadopsi untuk skala penerapan yang lebih luas, baik untuk kebutuhan perumahan



maupun komunal. Disarankan untuk mempertimbangkan penerapan sistem ini sebagai alternatif pengolahan air limbah yang efektif.

Untuk penelitian selanjutnya, disarankan untuk melakukan validasi kinerja desain melalui studi skala pilot atau lapangan, serta mengevaluasi efisiensi penghilangan polutan lain seperti nutrisi dan patogen. Optimasi parameter desain dan analisis kelayakan ekonomi juga merupakan area penting untuk eksplorasi di masa depan guna memaksimalkan potensi teknologi *Constructed Wetland*.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Abdel-Shafy, H. I., & Mansour, M. S. (2018). Constructed wetlands—an overview. *Egyptian Journal of Aquatic Research*, 44(3), 213-221.
- Brix, H. (2019). Constructed wetlands for wastewater treatment: An overview. In *Constructed wetlands for wastewater treatment* (pp. 1-12). CRC Press.
- Daud, N. N. N., & Ahmad, Z. A. (2019). Design and performance of a constructed wetland for domestic wastewater treatment in a tropical climate. *Water Science and Technology*, 80(10), 1945-1954.
- Hasan, M. M., Islam, M. A., & Rahman, M. M. (2021). Performance assessment of a constructed wetland system for domestic wastewater treatment: A case study. *Sustainable Environment Research*, 31(1), 1-10.
- Kadlec, R. H., & Wallace, S. D. (2000). *Treatment wetlands*. CRC Press.
- Mander, Ü., & Vohla, C. (2019). Constructed wetlands for wastewater treatment: Design and operation. In *Constructed wetlands for wastewater treatment* (pp. 13-40). CRC Press.
- Masi, F., & Bragatto, G. (2022). Design considerations for constructed wetlands treating domestic wastewater: A review. *Water Research*, 210, 117950.
- Mourad, M., & El-Gohary, F. A. (2021). Constructed wetlands for urban wastewater treatment: A review. *Journal of Environmental Management*, 277, 111444.
- Pond, B. W., & Smith, C. M. (2023). Optimizing hydraulic loading rates for BOD removal in horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 190, 106978.
- Tadesse, A. W., & Yared, S. G. (2022). Performance evaluation of horizontal subsurface flow constructed wetland for domestic wastewater treatment. *Journal of Environmental Management*, 301, 113921.
- Uchechukwu-Agwuna, C. N., Onwughara, I. C., & Ejechi, B. O. (2020). Design and performance evaluation of a pilot-scale constructed wetland for domestic wastewater treatment. *Journal of Cleaner Production*, 244, 118856.

- Vymazal, J. (2011). Constructed wetlands for wastewater treatment: a review. *Water*, 3(4), 991-1017.
- Wang, L., Liu, X., & Zhang, Y. (2022). Factors affecting BOD removal efficiency in constructed wetlands: A review. *Environmental Pollution*, 307, 119592.
- Zhang, D., Li, Y., & Wang, Z. (2020). BOD removal kinetics in horizontal subsurface flow constructed wetlands: A meta-analysis. *Journal of Hazardous Materials*, 399, 123025.