

Kajian Konseptual Teknologi *Constructed Wetlands* sebagai Sistem Pengolahan Limbah Cair Permukiman di Kelurahan Pampang Kota Makassar

Darwis Baso

Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Muslim Indonesia, Makassar

*Koresponden email: darwis.baso@umi.ac.id

Diterima: 3 Januari 2026

Disetujui: 14 Januari 2026

Abstract

Domestic wastewater management at the neighborhood scale remains a significant environmental challenge, particularly in areas with limited sanitation infrastructure. Pampang Village, Makassar City faces constraints related to the suboptimal performance of domestic wastewater treatment systems, which may degrade residential environmental quality and contaminate surrounding water bodies. *Constructed wetlands* (CW) have emerged as nature-based wastewater treatment technologies offering sustainable and locally adaptive sanitation alternatives. This study aims to examine the conceptual suitability of CW as a domestic wastewater treatment system at the neighborhood level in Pampang Village, Makassar City. The research method is based on a literature review and conceptual analysis of CW working principles, system types and characteristics, and their suitability in terms of technical, operational, environmental, and social aspects. The results indicate that CW demonstrate a high level of suitability for implementation at the neighborhood scale. Domestic wastewater with moderate organic loads allows CW to operate effectively through the integration of physical, chemical, and biological processes. Design flexibility, particularly in vertical-flow and hybrid systems, enhances adaptability to land limitations, while low energy requirements and operational simplicity support community-based implementation.

Keywords: *constructed wetlands; pampang village; domestic wastewater; wastewater treatment; water body protection*

Abstrak

Pengelolaan limbah cair domestik pada skala permukiman masih menjadi permasalahan lingkungan yang signifikan, khususnya di wilayah dengan keterbatasan infrastruktur sanitasi. Kelurahan Pampang Kota Makassar menghadapi tantangan berupa belum optimalnya sistem pengolahan limbah cair domestik, yang berpotensi menurunkan kualitas lingkungan permukiman dan mencemari badan air di sekitarnya. *Constructed wetlands* (CW) merupakan teknologi pengolahan limbah berbasis proses alami yang berkembang sebagai alternatif sistem sanitasi berkelanjutan dan adaptif terhadap kondisi lokal. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji kesesuaian konseptual teknologi CW sebagai sistem pengolahan limbah cair permukiman di Kelurahan Pampang Kota Makassar. Metode penelitian menggunakan pendekatan kajian literatur dan analisis konseptual terhadap prinsip kerja, jenis dan karakteristik sistem CW, serta kesesuaiannya ditinjau dari aspek teknis, operasional, lingkungan, dan sosial. Hasil kajian menunjukkan bahwa CW memiliki tingkat kesesuaian yang tinggi untuk diterapkan pada skala kelurahan. Karakteristik limbah cair domestik dengan beban organik moderat memungkinkan CW bekerja secara efektif melalui integrasi proses fisika, kimia, dan biologi. Fleksibilitas desain, khususnya pada sistem aliran vertikal dan hibrida, menjadikan CW adaptif terhadap keterbatasan lahan dan mendukung penerapan berbasis komunitas dengan kebutuhan energi yang rendah.

Kata Kunci: *constructed wetlands, kelurahan pampang, limbah cair permukiman, pengolahan limbah, perlindungan badan air*

1. Pendahuluan

Pengelolaan limbah cair domestik masih menjadi permasalahan lingkungan yang signifikan di kawasan permukiman, terutama pada wilayah kelurahan yang memiliki keterbatasan infrastruktur sanitasi, seperti Kelurahan Pampang Kota Makassar. Limbah cair rumah tangga umumnya mengandung beban pencemar organik tinggi yang ditunjukkan oleh konsentrasi *biochemical oxygen demand* (BOD), *chemical oxygen demand* (COD), padatan tersuspensi, nutrien nitrogen dan fosfor, serta mikroorganisme patogen. Apabila dibuang tanpa pengolahan yang memadai, limbah tersebut berpotensi mencemari badan air

permukaan dan air tanah, serta menimbulkan risiko kesehatan masyarakat [1], [2]. Secara global, lebih dari 80% air limbah domestik di negara berkembang dilepas ke lingkungan tanpa pengolahan yang layak, mencerminkan masih lemahnya sistem sanitasi di banyak kawasan permukiman [3]. Kondisi ini sejalan dengan karakteristik permukiman di Indonesia, di mana sistem pengolahan limbah terpusat belum menjangkau seluruh wilayah dan teknologi konvensional sering terkendala oleh biaya investasi, kebutuhan energi tinggi, serta kompleksitas operasi dan pemeliharaan [4].

Keterbatasan tersebut mendorong perlunya pengembangan sistem pengolahan limbah cair terdesentralisasi yang lebih adaptif, berbiaya rendah, dan sesuai dengan kondisi sosial-ekologis lokal. Dalam konteks ini, teknologi *constructed wetlands* (CW) berkembang sebagai salah satu pendekatan *nature-based solutions* yang meniru proses alami pada lahan basah melalui interaksi antara media, mikroorganisme, dan vegetasi air. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa CW mampu menurunkan parameter pencemar utama seperti BOD, COD, *total suspended solids* (TSS), serta nutrien dengan efisiensi yang kompetitif, khususnya pada skala kecil hingga menengah [5], [6]. Perkembangan desain CW dalam beberapa tahun terakhir mencakup variasi tipe aliran (horizontal, vertikal, dan hibrida), pemanfaatan media reaktif, serta optimasi vegetasi lokal untuk meningkatkan proses biodegradasi dan penyerapan nutrient [7], [8].

Selain kinerja teknis, CW memiliki keunggulan lain berupa kebutuhan energi yang rendah, kemudahan operasi, serta potensi integrasi dengan ruang terbuka hijau dan lanskap permukiman. Studi di Indonesia menunjukkan bahwa CW efektif diterapkan untuk pengolahan limbah domestik dan *greywater*, dengan kinerja yang dipengaruhi oleh faktor desain seperti jenis aliran, karakteristik media, kerapatan tanaman, dan kondisi aerasi [9], [10], [11]. Inovasi terkini juga mengarah pada integrasi CW dengan teknologi tambahan, seperti *constructed wetland-microbial fuel cell* (CW-MFC), yang terbukti mampu meningkatkan efisiensi pengolahan tanpa menambah kompleksitas sistem secara signifikan [12], [13]. Di sisi lain, nilai tambah ekologis CW menjadikannya relevan sebagai elemen pendukung perencanaan permukiman berkelanjutan, yang tidak hanya berfungsi sebagai unit pengolahan limbah, tetapi juga sebagai ruang hijau dan bagian dari strategi pengelolaan lingkungan berbasis alam [14], [15].

Meskipun demikian, sebagian besar penelitian terdahulu masih berfokus pada evaluasi kinerja teknis atau pengujian eksperimental secara parsial. Kajian konseptual yang mengintegrasikan prinsip kerja, variasi sistem, serta kesesuaian penerapan CW dengan karakteristik lingkungan, sosial, dan kelembagaan permukiman lokal masih relatif terbatas, khususnya pada skala kelurahan di Indonesia [16], [17]. Padahal, keberhasilan penerapan CW sangat dipengaruhi oleh konteks lokal, termasuk ketersediaan lahan, karakteristik limbah, serta tingkat partisipasi dan penerimaan masyarakat [18], [19].

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menyusun kajian konseptual mengenai teknologi CW sebagai sistem pengolahan limbah cair permukiman di Kelurahan Pampang Kota Makassar. Kajian ini menitikberatkan pada identifikasi permasalahan pengelolaan limbah cair domestik, telaah konsep dan prinsip kerja CW, analisis jenis dan karakteristik sistem, serta evaluasi kesesuaian konseptual penerapannya terhadap kondisi permukiman setempat. Kesenjangan penelitian terletak pada minimnya pendekatan integratif yang mengaitkan aspek teknis, ekologis, dan kontekstual lokal dalam perencanaan sistem CW. Oleh karena itu, hipotesis yang dikembangkan dalam kajian ini adalah bahwa teknologi CW, apabila dirancang sesuai dengan karakteristik limbah dan kondisi lokal Kelurahan Pampang, berpotensi menjadi solusi pengolahan limbah cair yang efektif, berkelanjutan, dan aplikatif pada tingkat kelurahan.

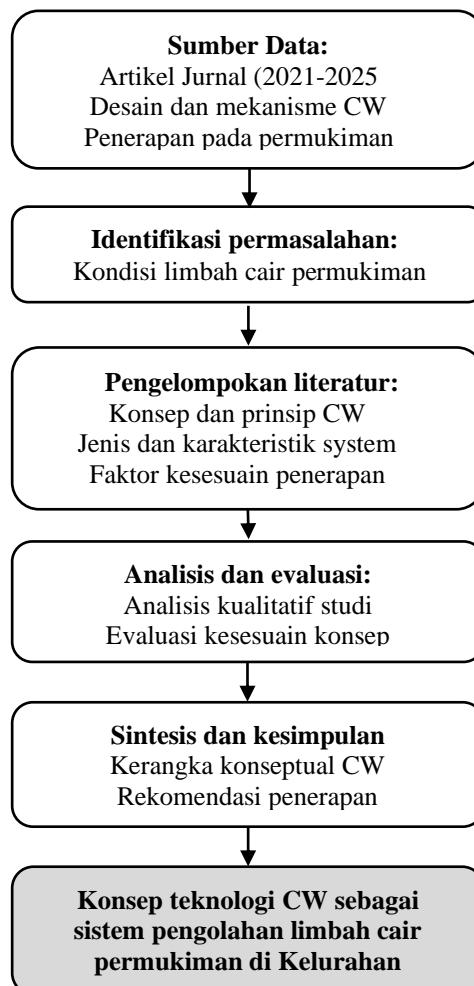
2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kajian konseptual berbasis studi literatur untuk menganalisis teknologi CW sebagai sistem pengolahan limbah cair permukiman di Kelurahan Pampang Kota Makassar. Pendekatan ini dipilih karena penelitian bertujuan membangun pemahaman konseptual mengenai prinsip kerja, jenis sistem, dan kesesuaian penerapan CW, tanpa melakukan pengujian kinerja secara eksperimental [16]. Data penelitian bersumber dari artikel ilmiah yang dipublikasikan pada jurnal nasional dan internasional bereputasi dalam rentang waktu 2021-2025. Literatur yang dikaji difokuskan pada topik CW untuk pengolahan limbah cair domestik permukiman, meliputi aspek desain sistem, mekanisme penyisihan pencemar, serta penerapan pada sistem pengolahan limbah cair skala terdesentralisasi. Pemilihan referensi dilakukan melalui basis data ilmiah yang relevan untuk memastikan validitas dan kebaruan informasi.

Tahapan penelitian pada **Gambar 1**, meliputi: (1) identifikasi permasalahan pengelolaan limbah cair permukiman berdasarkan kondisi umum permukiman skala kelurahan dan temuan studi terdahulu; (2) pengelompokan literatur ke dalam tema utama, yaitu konsep dan prinsip kerja CW, jenis dan karakteristik

sistem, serta faktor kesesuaian penerapan pada kawasan permukiman; dan (3) analisis kualitatif terhadap literatur untuk mengidentifikasi pola dan temuan utama antar penelitian.

Analisis kesesuaian dilakukan dengan membandingkan karakteristik sistem CW yang dilaporkan dalam literatur dengan kondisi permukiman, mencakup karakteristik limbah cair domestik, kebutuhan lahan, kemudahan operasi dan pemeliharaan, serta potensi keterlibatan masyarakat. Hasil analisis selanjutnya disintesis secara naratif untuk menghasilkan gambaran konseptual mengenai potensi penerapan teknologi CW di Kelurahan Pampang Kota Makassar sebagai dasar penyusunan hasil dan pembahasan.



Gambar 1. Diagram metode penelitian

3. Hasil dan Pembahasan

Identifikasi Permasalahan Pengelolaan Limbah Cair Permukiman

Pengelolaan limbah cair permukiman pada skala kelurahan, termasuk di Kelurahan Pampang Kota Makassar, masih menghadapi permasalahan yang kompleks baik dari sisi teknis, struktural, maupun sosial. Limbah cair domestik yang berasal dari aktivitas rumah tangga seperti mandi, mencuci, memasak, dan sanitasi mengandung beban bahan organik, nutrien, serta mikroorganisme patogen dalam jumlah signifikan. Tanpa pengolahan yang memadai, limbah tersebut berpotensi mencemari badan air permukaan dan air tanah, menurunkan kualitas lingkungan permukiman, serta meningkatkan risiko gangguan kesehatan masyarakat [16], [20].

Pencemaran lingkungan dari limbah cair domestik sering tercermin pada karakteristik kualitas air yang jauh melebihi nilai baku mutu. Studi di permukiman Bada Village melaporkan bahwa limbah cair domestik (greywater) memiliki kadar BOD antara 120,9-180,3 mg/L, COD 310,5-356,89 mg/L, dan TSS 98-115 mg/L, yang semuanya melebihi ambang baku mutu limbah domestik yang ditetapkan oleh peraturan lingkungan setempat [21]. Kondisi ini tidak hanya memperbesar potensi degradasi kualitas perairan, tetapi juga menurunkan daya dukung lingkungan permukiman secara keseluruhan [1], [22]. Efektivitas CW dalam pengolahan limbah cair juga dibuktikan melalui berbagai studi komparatif. Dalam penelitian melaporkan bahwa pada IPAL Gambiran, efisiensi penyisihan BOD, COD, dan TSS masing-masing mencapai 24,01%,

45%, dan 40% [1]. Namun, pada IPAL Mendiro yang mengombinasikan CW dengan teknologi *Rotating Biological Contactor* (RBC), efisiensi meningkat signifikan hingga 95,85% untuk BOD, 85,83% untuk COD, dan 98,12% untuk TSS. Integrasi CW dan RBC terbukti memperluas permukaan kontak mikroorganisme serta memperkuat proses degradasi biologis, sehingga meningkatkan kinerja pengolahan. Selain itu, evaluasi terhadap kinerja instalasi pengolahan air limbah (IPAL) komunal di beberapa wilayah menunjukkan bahwa efisiensi pengolahan sering kali menurun akibat lemahnya aspek operasi dan pemeliharaan dalam jangka panjang [4].

Permasalahan teknis tersebut diperparah oleh keterbatasan penerapan sistem pengolahan cair terpusat. Kajian literatur menunjukkan bahwa sistem perpipaan dan IPAL konvensional memerlukan biaya investasi, operasi, dan pemeliharaan yang relatif tinggi, sehingga sulit diterapkan secara merata pada kawasan permukiman skala kecil dan berpendapatan menengah ke bawah. Akibatnya, banyak wilayah masih mengandalkan sistem pembuangan langsung ke saluran drainase atau lingkungan terbuka, yang pada akhirnya memperburuk kondisi lingkungan dan sanitasi [23]. Selain faktor teknis dan ekonomi, dimensi sosial juga berperan penting dalam menentukan keberhasilan pengelolaan limbah cair permukiman. Tingkat kesadaran, kepedulian, dan partisipasi masyarakat dalam pengelolaan limbah cair umumnya masih rendah, terutama di kawasan yang belum memiliki sistem sanitasi komunal yang mapan. Beberapa penelitian menegaskan bahwa kegagalan sistem pengolahan limbah cair sering kali lebih disebabkan oleh kurangnya keterlibatan masyarakat dan ketidaksesuaian sistem dengan kondisi sosial-budaya setempat dibandingkan oleh keterbatasan teknologi itu sendiri [20], [24].

Berdasarkan berbagai permasalahan tersebut, diperlukan pendekatan pengelolaan limbah cair yang lebih adaptif, kontekstual, dan berkelanjutan. Sistem pengolahan limbah cair yang bersifat terdesentralisasi, fleksibel, serta dapat diintegrasikan dengan lingkungan permukiman menjadi kebutuhan mendesak. Dalam konteks ini, teknologi CW muncul sebagai alternatif yang relevan karena dapat dirancang sesuai skala komunitas, memiliki kebutuhan energi yang rendah, serta relatif mudah dalam pengoperasian dan pemeliharaan. Karakteristik tersebut menjadikan CW berpotensi menjawab tantangan teknis, ekonomi, dan sosial dalam pengelolaan limbah cair permukiman [16].

Kajian Konsep dan Prinsip Kerja CW

Sebagai respons terhadap keterbatasan sistem pengolahan limbah cair konvensional yang cenderung berbiaya tinggi dan membutuhkan operasi teknis yang kompleks, CW berkembang sebagai pendekatan pengolahan berbasis ekologi yang meniru fungsi lahan basah alami. Sistem ini dirancang untuk memanfaatkan interaksi alami antara media substrat, vegetasi air, dan komunitas mikroorganisme dalam menurunkan konsentrasi pencemar melalui kombinasi proses fisik, kimia, dan biologis. Pendekatan ini menjadikan CW lebih adaptif terhadap kondisi lingkungan lokal serta sesuai untuk diterapkan pada sistem pengolahan limbah cair skala kecil hingga menengah, khususnya di kawasan permukiman [2].

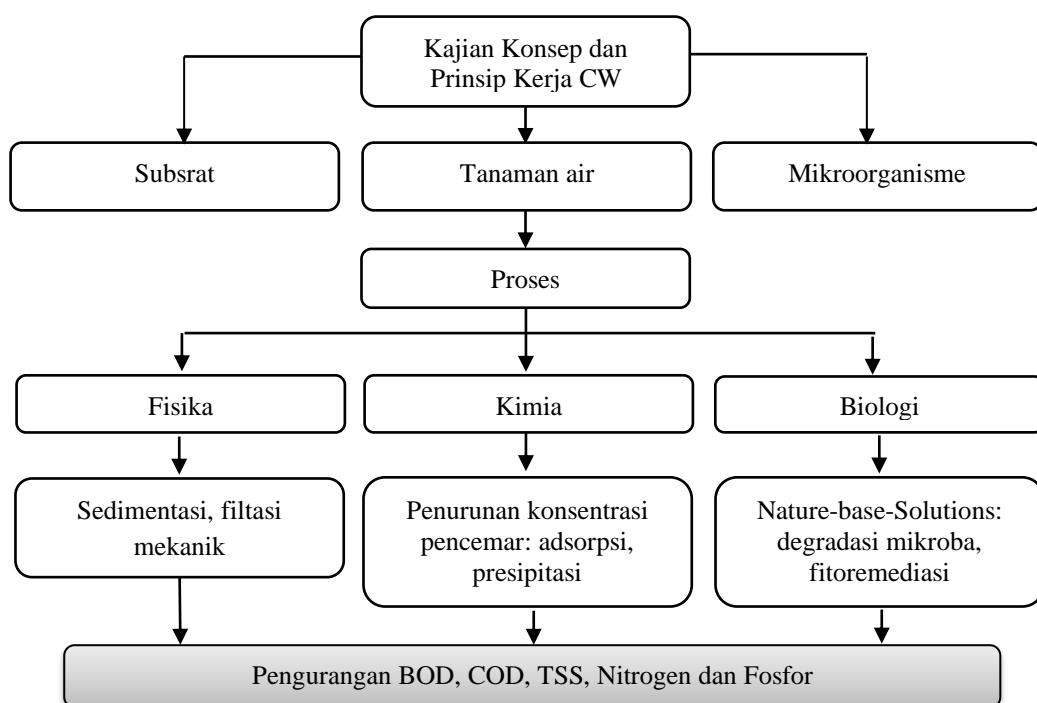
Di tingkat mekanisme, kinerja CW ditentukan oleh sinergi berbagai proses alami yang berlangsung secara simultan di dalam sistem. Mekanisme fisik berperan penting melalui proses sedimentasi dan filtrasi padatan tersuspensi ketika air limbah mengalir secara lambat melewati media berpori seperti pasir, kerikil, dan material organik. Kondisi ini memungkinkan partikel tersuspensi mengendap dan tersaring secara mekanis, sehingga menurunkan konsentrasi *Total Suspended Solids* (TSS) serta mengurangi beban pencemar awal sebelum memasuki tahapan pengolahan berikutnya [2]. Studi pada *pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetlands* menunjukkan bahwa kombinasi media pasir–kerikil berkontribusi signifikan terhadap penyisihan TSS dari limbah cair domestik berbasis sumber titik, sekaligus meningkatkan stabilitas kinerja sistem dalam menghadapi fluktuasi beban pencemar [16]. Temuan ini mengonfirmasi bahwa proses fisik merupakan tahapan awal yang krusial dalam sistem CW, karena berfungsi sebagai prapengolahan alami yang mendukung efektivitas proses kimia dan biologis selanjutnya.

Proses kimia dalam CW berlangsung melalui mekanisme adsorpsi dan presipitasi pada media substrat, yang berperan dalam penyisihan fosfat dan logam berat. Sementara itu, dalam CW, proses biologis merupakan mekanisme utama yang menguraikan bahan organik dan mentransformasi pencemar melalui aktivitas komunitas mikroorganisme yang melibatkan dekomposisi aerob dan anaerob, serta jalur nitrifikasi-denitrifikasi yang terintegrasi untuk menurunkan BOD, COD, dan nutrien dalam limbah cair domestik [25].

Pengelolaan air limbah domestik di kawasan padat penduduk umumnya masih menggunakan sistem cublik atau membuang langsung ke drainase tanpa pengolahan, yang berpotensi mencemari lingkungan [26]. Untuk mengatasi permasalahan pengelolaan air limbah domestik, dikembangkan sistem pengolahan terpadu yang mengombinasikan bak ekualisasi, bak sedimentasi, dan CW tipe *subsurface flow* (SSF). Studi perencanaan di Perumahan Lam Trieng Madani menunjukkan bahwa sistem ini mampu mencapai efisiensi

penyisihan TSS sebesar 89% dan total koliform 48% dengan kebutuhan lahan sekitar 97,75 m², sehingga efektif diterapkan pada skala perumahan dengan ketersediaan lahan yang memadai [26]. Efektivitas sistem tersebut sangat dipengaruhi oleh peran vegetasi air yang menyediakan permukaan bagi biofilm mikroorganisme, meningkatkan difusi oksigen ke zona perakaran, serta menjaga stabilitas media dan mencegah penyumbatan aliran [2].

Dalam konteks pengelolaan lingkungan yang lebih luas, CW juga diposisikan sebagai bagian dari pendekatan *nature-based solutions* (NBS). Pendekatan ini memandang CW tidak hanya sebagai unit teknis pengolahan limbah, tetapi sebagai elemen sistem ekologis yang memberikan manfaat tambahan, seperti peningkatan kualitas lanskap, konservasi keanekaragaman hayati, pengendalian limpasan permukaan, serta penguatan fungsi ekosistem di kawasan permukiman. Dengan demikian, penerapan CW sejalan dengan prinsip pembangunan berkelanjutan yang mengintegrasikan aspek lingkungan, sosial, dan ekonomi secara simultan [19], [20].



Validitas konseptual CW diperkuat oleh berbagai temuan empiris dari penelitian terdahulu. Secara operasional, sistem CW terbukti mampu menurunkan beban pencemar limbah cair domestik melalui mekanisme fisik, kimia, dan biologis yang saling mendukung. Hasil penelitian menunjukkan bahwa CW memiliki efisiensi penyisihan pencemar yang stabil dengan variasi kinerja yang dipengaruhi oleh desain sistem dan kondisi operasional [9]. Prinsip kerja serupa juga diterapkan pada pengolahan limbah cair dari fasilitas khusus, seperti rumah sakit, yang menunjukkan hasil pengolahan yang efektif dan konsisten [27]. Temuan-temuan ini menegaskan bahwa CW merupakan teknologi yang secara konseptual dan praktis layak dikembangkan sebagai solusi pengolahan limbah cair permukiman.

Diagram **Gambar 2** menunjukkan bahwa konsep dan prinsip kerja CW didasarkan pada interaksi sinergis antara substrat, tanaman air, dan mikroorganisme yang menggerakkan proses pengolahan secara fisik, kimia, dan biologis. Melalui mekanisme sedimentasi, filtrasi, adsorpsi, presipitasi, serta degradasi mikroba, sistem ini mampu menurunkan konsentrasi pencemar limbah cair secara alami. Integrasi ketiga komponen utama tersebut menegaskan posisi CW sebagai pendekatan *nature-based solutions* yang tidak hanya berfungsi sebagai unit teknis pengolahan limbah, tetapi juga mendukung keberlanjutan ekologis dan kualitas lingkungan permukiman.

Tabel 1. Penggerak Utama Proses Pengolahan Limbah pada CW

Jalur Proses	Penggerak Utama	Mekanisme	Kontribusi	Indikator Kinerja	Standar / Baku Mutu	Referensi
Fisik	Substrat (kerikil, pasir, tanah, media buatan) dan struktur vegetasi	Sedimentasi partikel tersuspensi, filtrasi mekanik, penahanan padatan	Menurunkan TSS, kekeruhan, dan beban partikel organik/anorganik	BOD, COD, TSS	BOD ≤ 30 mg/L, COD ≤ 100 mg/L, TSS ≤ 30 mg/L, pH 6-9, NH ₃ -N ≤ 10 mg/L	[28], [29]
Fisik	Tanaman air (batang, daun, akar)	Memperlambat aliran, meningkatkan waktu tinggal, pengendapan partikel	Meningkatkan efisiensi penghilangan padatan dan polutan terikat partikel	BOD, COD, TSS	BOD ≤ 30 mg/L, COD ≤ 100 mg/L, TSS ≤ 30 mg/L, pH 6-9, NH ₃ -N ≤ 10 mg/L	[28], [29]
Kimia	Substrat dan media reaktif	Adsorpsi nutrien dan logam berat, presipitasi senyawa anorganik	Menurunkan konsentrasi fosfat, amonium, dan logam berat	TP, NH ₃ -N, Logam Berat	NH ₃ -N ≤ 10 mg/L, pH 6-9; TP & logam berat mengacu guideline nasional/internasional	[28], [29]
Kimia	Kondisi redoks dan pH mikro	Reaksi oksidasi-reduksi, pengendapan mineral	Mengendalikan bentuk kimia polutan dan toksisitasnya	TP, NH ₃ -N, Logam Berat	NH ₃ -N ≤ 10 mg/L, pH 6-9; TP & logam berat mengacu guideline lokal/internasional	[28], [29]
Biologis	Mikroorganisme (bakteri, jamur, archaea)	Degradasi bahan organik, nitrifikasi, denitrifikasi, transformasi nutrien	Menurunkan BOD, COD, nitrogen, senyawa organik kompleks	BOD, COD, TN, NH ₃ -N, NO ₃ -N	BOD ≤ 30 mg/L, COD ≤ 100 mg/L, TN/NH ₃ -N ≤ 10 mg/L, pH 6-9	[28], [29]
Biologis	Zona perakaran (rhizosphere)	Stimulasi aktivitas mikroba, simbiosis tanaman-mikroba	Meningkatkan stabilitas proses biologis dan efisiensi pengolahan	BOD, COD, TN, TP	BOD ≤ 30 mg/L, COD ≤ 100 mg/L, TN ≤ 10 mg/L; TP mengacu guideline nasional/internasional	[28], [29]
Integratif	Interaksi substrat-tanaman-mikroorganisme	Proses pengolahan multi-jalur yang saling memperkuat	Efisiensi pengolahan tinggi dan keberlanjutan sistem jangka panjang	BOD, COD, TN, TP, Logam Berat	Sesuai indikator masing-masing; acuan baku mutu nasional & guideline nasional/ lokal/internasional	[1], [29]

Tabel 1 menunjukkan bahwa efektivitas CW didorong oleh interaksi sinergis jalur fisik, kimia, dan biologis. Jalur fisik, melalui substrat dan tanaman, menurunkan TSS, BOD, dan COD melalui sedimentasi dan filtrasi; jalur kimia mengurangi nutrien dan logam berat melalui adsorpsi, presipitasi, dan reaksi redoks; sementara jalur biologis, yang dikendalikan oleh mikroorganisme dan rhizosphere, memfasilitasi degradasi organik dan transformasi nutrien. Secara keseluruhan, indikator kinerja utama dapat dicapai sesuai baku mutu [4].

Analisis Jenis dan Karakteristik Sistem CW

CW merupakan sistem pengolahan limbah cair yang dirancang untuk meniru mekanisme biogeokimia alami yang berlangsung di lahan basah. Berdasarkan karakteristik aliran dan desain hidroliknya, CW diklasifikasikan menjadi free water surface flow (FWS), horizontal subsurface flow (HSSF), vertical subsurface flow (VSSF), serta sistem hibrida yang mengombinasikan lebih dari satu tipe aliran [2], [5]. Pemilihan tipe sistem menjadi faktor kunci karena berpengaruh langsung terhadap efisiensi penghilangan polutan, kebutuhan lahan, serta kemudahan operasi dan pemeliharaan, terutama dalam penerapan pada kawasan permukiman dan komunitas skala kecil [16], [30].

Salah satu tipe yang banyak dikembangkan adalah *vertical flow constructed wetlands* (VFCW), di mana aliran limbah bergerak secara vertikal melalui media substrat, menciptakan kondisi yang relatif lebih aerobik dan mendukung oksidasi bahan organik serta nitrifikasi. Beberapa studi menunjukkan bahwa VFCW efektif dalam menurunkan konsentrasi BOD dan TSS secara signifikan, dengan efisiensi BOD mencapai sekitar 88-93% dalam pengolahan septage dan sekitar 70-81% untuk limbah dengan kekuatan organik menengah, serta dapat meningkatkan penghilangan nitrogen melalui mekanisme biologis oksidatif dan anoksik tergantung desain substrat dan operasi [2], [16]. Kondisi aliran vertikal dan karakteristik media berpori menjadikan VFCW lebih sesuai diterapkan di kawasan permukiman dengan keterbatasan lahan dibandingkan tipe horizontal karena footprint yang relatif kecil tanpa mengorbankan performa dasar pengolahan [30].

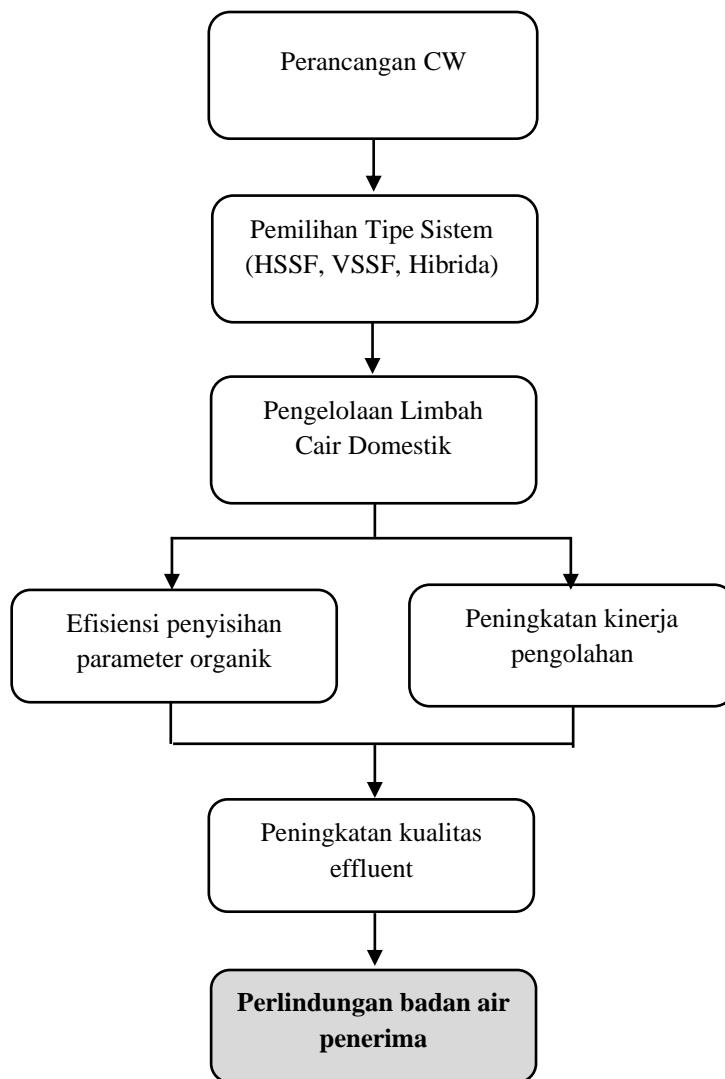
Sebaliknya, *horizontal subsurface flow constructed wetlands* (HSFCW) mengalirkan limbah secara horizontal di bawah permukaan media berpori seperti gravel atau pasir yang ditanami vegetasi berakar. Sistem ini membentuk zonasi aerob-anoksik di dalam media, yang mendukung proses filtrasi, adsorpsi, serta aktivitas biofilm mikroorganisme dalam penyisihan BOD, COD, dan Total Suspended Solids (TSS). Meskipun HSFCW umumnya memerlukan lahan yang lebih luas dibandingkan VFCW, sistem ini relatif sederhana dalam pengoperasian dan pemeliharaan serta lebih stabil dalam jangka panjang [31].

Untuk mengoptimalkan kinerja pengolahan, banyak penelitian mengembangkan CW tipe hibrida yang mengombinasikan dua atau lebih unit CW, seperti VFCW dan HSFCW. Sistem hibrida memanfaatkan keunggulan masing-masing tipe, di mana VFCW berperan dominan dalam oksidasi bahan organik dan nitrifikasi, sedangkan HSFCW mendukung proses denitrifikasi dan penyisihan lanjutan senyawa organik. Berbagai studi menunjukkan bahwa sistem hibrida umumnya memiliki performa terbaik dalam penghilangan nitrogen total, fosfor, BOD, dan COD, terutama pada konteks permukiman dengan variasi kualitas limbah yang tinggi dan keterbatasa [16], [25].

Selain tipe aliran, kinerja CW juga dipengaruhi oleh sejumlah karakteristik desain dan kondisi operasional. Jenis substrat, seperti gravel, pasir, atau soil, menentukan kapasitas adsorpsi, habitat mikroorganisme, serta dukungan fisik bagi pertumbuhan vegetasi. Pemilihan jenis vegetasi, misalnya *Phragmites australis*, *Typha* sp., atau *Iris* sp., berperan dalam suplai oksigen ke zona perakaran dan penyediaan permukaan bagi biofilm mikroba. Waktu tinggal hidraulik (*hydraulic retention time-HRT*) memengaruhi intensitas interaksi antara air limbah, mikroorganisme, tanaman, dan substrat, sehingga menjadi parameter penting dalam perancangan sistem. Selain itu, kondisi iklim seperti suhu dan curah hujan turut memengaruhi metabolisme mikroba dan pertumbuhan vegetasi, sementara keterlibatan masyarakat berkontribusi terhadap keberlanjutan operasi dan pemeliharaan sistem dalam jangka panjang [16], [31].

Perbedaan arah aliran dan kondisi hidraulik tersebut berimplikasi langsung terhadap mekanisme penyisihan pencemar. Sistem VSSF umumnya menunjukkan efisiensi tinggi dalam penghilangan bahan organik dan amonia akibat suplai oksigen yang lebih baik, sedangkan sistem HSSF lebih efektif dalam mendukung proses denitrifikasi karena dominasi kondisi anaerob di dalam media. Oleh karena itu, integrasi kedua sistem dalam bentuk CW hibrida banyak direkomendasikan untuk meningkatkan efisiensi pengolahan secara keseluruhan [31].

Seiring meningkatnya kompleksitas karakteristik limbah domestik, inovasi desain CW juga terus berkembang. Penelitian terbaru menyoroti penerapan desain modular serta penambahan material fungsional, seperti biochar, untuk meningkatkan penyisihan mikro-polutan dan senyawa farmasi. Selain itu, integrasi CW dengan proses tambahan, seperti koagulasi atau *constructed wetlands-microbial fuel cell* (CW-MFC), dilaporkan mampu meningkatkan kinerja pengolahan tanpa menambah kompleksitas sistem secara signifikan. Temuan empiris ini menunjukkan bahwa CW memiliki fleksibilitas tinggi untuk dikembangkan sesuai tantangan kualitas limbah yang semakin kompleks, sekaligus mempertahankan prinsip dasar sebagai sistem pengolahan berbasis alam [12], [13].



Gambar 3. Diagram konseptual perancangan dan dampak penerapan CW

Pada **Gambar 3** di atas menunjukkan alur konseptual penerapan CW dalam pengolahan limbah cair domestik. Proses dimulai dari perancangan CW, dilanjutkan dengan pemilihan tipe sistem (HSSF, VSSF, atau hibrida) sesuai kondisi lahan dan karakteristik limbah. Sistem terpilih kemudian digunakan untuk pengelolaan limbah cair domestik melalui proses fisik, kimia, dan biologis alami. Pengolahan ini menghasilkan peningkatan efisiensi penyisihan parameter organik serta peningkatan kinerja sistem pengolahan, yang secara langsung berdampak pada peningkatan kualitas efluen. Pada tahap akhir, efluen yang lebih baik berkontribusi pada perlindungan badan air penerima dan mendukung keberlanjutan lingkungan. Pada **Tabel 2** diuraikan perbandingan efisiensi penghilangan polutan untuk masing-masing tipe CW berdasarkan literatur 2021-2025.

Tabel 2 menunjukkan bahwa pemilihan tipe CW sangat ditentukan oleh keterbatasan lahan, target polutan, serta stabilitas operasi jangka panjang. Sistem VFCW dan hibrida menjadi opsi paling relevan untuk kawasan permukiman padat karena efisiensi tinggi dengan kebutuhan ruang yang relatif kecil.

Tabel 2. Analisis jenis dan karakteristik sistem CW

Tipe CW	Pola Aliran & Kondisi Hidraulik	Mekanisme Dominan Penyisihan	Kinerja Umum Penghilangan Polutan	Kebutuhan Lahan & Operasional	Kesesuaian Aplikasi	Referensi
Free Water Surface Flow (FWS)	Aliran permukaan terbuka, kondisi aerob-anaerob bervariasi	Sedimentasi, filtrasi alami, proses biologis di kolom air dan sedimen	Efektif untuk BOD, TSS, dan patogen; efisiensi nutrien moderat	Membutuhkan lahan luas; operasi sederhana	Kawasan pedesaan, daerah dengan ketersediaan lahan tinggi	[2], [5]
Horizontal Subsurface Flow CW (HSSF / HSFCW)	Aliran horizontal di bawah permukaan media berpori; dominan anoksik-anaerob	Filtrasi, adsorpsi, biofilm mikroorganisme, denitrifikasi	BOD: 65-85%; COD: 55-75%; TSS: 70-90%; N terbatas	Lahan relatif luas; stabil dan mudah dipelihara	Permukiman skala kecil-menengah dengan lahan cukup	[2], [31]
Vertical Subsurface Flow CW (VSSF / VFCW)	Aliran vertikal dari atas ke bawah; kondisi relatif aerobik	Oksidasi organik, nitrifikasi, filtrasi media	BOD: ±70-93%; TSS tinggi; NH ₄ ⁺ -N signifikan	Footprint kecil; operasi periodik	Permukiman padat, lahan terbatas	[16], [30]
Hybrid CW (VFCW + HSFCW)	Kombinasi aliran vertikal dan horizontal	Nitrifikasi-denitrifikasi terintegrasi, oksidasi & penyisihan lanjutan	BOD & COD: 85-95%; TN & TP lebih tinggi dari sistem tunggal	Lahan moderat; desain lebih kompleks	Permukiman dengan variasi kualitas limbah tinggi	[9], [16]
CW dengan Material Fungsional / Inovatif	Bervariasi (VSSF/HSSF/modular)	Adsorpsi lanjutan, degradasi mikro-polutan	Efektif untuk farmasi & mikro-polutan	Kompleksitas meningkat namun fleksibel	Limbah domestik kompleks	[13], [30]

Tabel 2 menunjukkan bahwa pemilihan tipe CW sangat ditentukan oleh keterbatasan lahan, target polutan, serta stabilitas operasi jangka panjang. Sistem VFCW dan hibrida menjadi opsi paling relevan untuk kawasan permukiman padat karena efisiensi tinggi dengan kebutuhan ruang yang relatif kecil.

Evaluasi Kesesuaian Konseptual dengan Kondisi Permukiman

Kesesuaian penerapan CW pada skala kelurahan sangat ditentukan oleh tingkat keselarasan antara karakteristik sistem dengan kondisi lokal, yang mencakup ketersediaan lahan, karakteristik limbah cair domestik, kapasitas pengelolaan masyarakat, serta dukungan kelembagaan yang ada. Literatur terbaru menegaskan bahwa keberhasilan CW tidak hanya bergantung pada aspek teknis, tetapi juga pada kemampuan sistem untuk beradaptasi dengan konteks sosial dan spasial permukiman [16], [26].

Evaluasi kesesuaian konseptual penerapan CW di Kelurahan Pampang Kota Makassar dilakukan berdasarkan empat aspek utama. Pertama, dari sisi karakteristik limbah cair domestik, beban pencemar organik seperti BOD dan COD pada limbah permukiman umumnya berada pada kategori rendah hingga moderat, sehingga secara teknis masih berada dalam rentang yang dapat diolah secara efektif oleh sistem CW [16], [26]. Kedua, dari aspek kebutuhan lahan, tipe *vertical flow constructed wetlands* (VFCW) atau sistem hibrida lebih direkomendasikan untuk kawasan dengan keterbatasan ruang, sedangkan *horizontal subsurface flow constructed wetlands* (HSFCW) lebih sesuai diterapkan pada area permukiman yang memiliki ketersediaan lahan relatif lebih luas [17], [30]. Ketiga, dari aspek operasi dan pemeliharaan, CW memiliki tingkat kompleksitas yang rendah, tidak memerlukan pasokan energi listrik secara kontinu, serta dapat dikelola oleh masyarakat setempat dengan pelatihan teknis yang minimal [24]. Keempat, dari sisi sosial, penerapan sistem berbasis vegetasi memberikan peluang besar bagi keterlibatan masyarakat, meningkatkan kesadaran lingkungan, serta menambah nilai sosial berupa ruang hijau fungsional di lingkungan permukiman sendiri [20], [24].

Dari perspektif teknis dan operasional, CW memiliki sejumlah keunggulan yang relevan bagi kawasan permukiman. Sistem ini dikenal memiliki kebutuhan energi yang rendah, toleransi yang baik terhadap fluktuasi debit dan beban pencemar, serta biaya operasi dan pemeliharaan yang relatif lebih kecil dibandingkan sistem pengolahan limbah cair konvensional. Karakteristik tersebut menjadikan CW lebih adaptif untuk diterapkan pada kawasan permukiman skala kecil hingga menengah yang memiliki keterbatasan sumber daya teknis dan finansial [17], [20], [30].

Selain efisiensi teknis, nilai tambah ekologis dan spasial juga menjadi pertimbangan penting dalam konteks permukiman. CW memungkinkan integrasi dengan ruang terbuka hijau dan elemen lanskap permukiman, sehingga berfungsi tidak hanya sebagai unit pengolahan limbah cair, tetapi juga sebagai elemen pendukung kualitas lingkungan. Integrasi ini sejalan dengan konsep arsitektur hijau dan perencanaan permukiman berkelanjutan yang menekankan sinergi antara infrastruktur teknis dan fungsi ekologis [20], [32].

Namun demikian, keberhasilan penerapan CW sangat bergantung pada perencanaan konseptual yang kontekstual dan partisipatif. Pemilihan tipe sistem, penentuan luas lahan, jenis media dan vegetasi, serta strategi pengelolaan harus disesuaikan dengan karakteristik fisik permukiman dan tingkat kesiapan sosial masyarakat. Sejumlah studi menegaskan bahwa keterlibatan masyarakat sejak tahap perencanaan, pembangunan, hingga operasional merupakan faktor kunci dalam menjamin keberlanjutan dan efektivitas sistem CW dalam jangka panjang [9], [24].

Dalam konteks implementasi berbasis komunitas, fleksibilitas skala CW menjadi keunggulan tersendiri. Sistem ini dapat dirancang untuk melayani kelompok rumah tangga, RT, atau RW, serta diintegrasikan dengan pendekatan pengelolaan lingkungan berbasis masyarakat. Pendekatan tersebut tidak hanya meningkatkan efektivitas pengolahan limbah cair, tetapi juga memperkuat rasa kepemilikan masyarakat terhadap infrastruktur sanitasi yang dibangun [18], [32].

Lebih jauh, penerapan CW juga berpotensi memberikan manfaat tidak langsung bagi ketahanan lingkungan permukiman. Dalam kerangka *nature-based solutions*, CW dapat berkontribusi terhadap mitigasi banjir lokal, peningkatan kualitas ekosistem, serta pengurangan tekanan terhadap badan air penerima. Dengan demikian, CW menjadi relevan sebagai bagian dari strategi pengelolaan lingkungan permukiman yang adaptif dan berkelanjutan [14], [33].

Tabel 3. Evaluasi kesesuaian teknologi CW dengan kondisi Kelurahan Pampang Kota Makassar

Aspek Analisis	Kondisi Umum Permukiman	Karakteristik CW	Tingkat Kesesuaian	Implikasi Konseptual
Skala Pengolahan	Skala kecil-menengah (RT/RW/Kelurahan)	Sistem terdesentralisasi, fleksibel dalam skala	Tinggi	CW sesuai untuk pengolahan limbah cair permukiman tanpa memerlukan sistem terpusat
Ketersediaan Lahan	Terbatas dan tersebar	Dapat dirancang modular (HSSF, VSSF, hibrida)	Sedang-Tinggi	Pemilihan tipe subsurface atau hibrida meningkatkan kesesuaian pada permukiman padat
Karakteristik Limbah	Limbah domestik dengan fluktuasi debit dan beban	Toleran terhadap variasi beban pencemar	Tinggi	CW stabil pada kondisi operasional yang tidak konstan
Kebutuhan Energi	Akses energi terbatas	Kebutuhan energi rendah / pasif	Tinggi	Cocok untuk kawasan dengan keterbatasan infrastruktur energi
Operasi dan Pemeliharaan	Kapasitas teknis masyarakat terbatas	Operasi sederhana, perawatan minimal	Tinggi	CW mudah dikelola oleh komunitas dengan pendampingan teknis ringan
Efisiensi Pengolahan	Target memenuhi baku mutu domestik	Efektif menurunkan BOD, COD, TSS, dan nutrien	Tinggi	CW mampu menghasilkan kualitas efluen yang layak lingkungan
Aspek Sosial	Partisipasi masyarakat bervariasi	Dapat dikelola berbasis komunitas	Tinggi	Keterlibatan masyarakat meningkatkan keberlanjutan sistem
Integrasi Lingkungan	Kebutuhan ruang hijau dan estetika	Terintegrasi dengan lanskap dan RTH	Tinggi	CW memberikan manfaat ekologis dan visual tambahan

Aspek Analisis	Kondisi Umum Permukiman	Karakteristik CW	Tingkat Kesesuaian	Implikasi Konseptual
Keberlanjutan Sistem	Keterbatasan jangka panjang	Biaya operasi dan pemeliharaan rendah	Tinggi	Mendukung keberlanjutan ekonomi dan lingkungan
Kesesuaian Konseptual Umum	Permukiman berkembang	Teknologi berbasis nature-based solutions	Sangat Tinggi	CW relevan sebagai solusi pengolahan limbah cair permukiman berkelanjutan

Pada **Tabel 3** menunjukkan bahwa evaluasi kesesuaian teknologi CW memiliki potensi yang kuat sebagai sistem pengolahan limbah cair permukiman. Sistem ini mengintegrasikan proses fisik, kimia, dan biologis secara alami untuk menurunkan beban pencemar, sekaligus menawarkan kebutuhan energi yang rendah serta biaya operasi dan pemeliharaan yang relatif kecil. Fleksibilitas desain CW memungkinkan penyesuaian terhadap kondisi fisik, karakteristik limbah, dan ketersediaan lahan melalui penerapan sistem HSSF, VSSF, maupun hibrida.

Dalam konteks Kelurahan Pampang Kota Makassar, hasil analisis menunjukkan bahwa kesesuaian konseptual CW berada pada kategori tinggi hingga sangat tinggi. Hal ini didukung oleh karakteristik sistem yang bersifat terdesentralisasi, toleran terhadap fluktuasi beban limbah domestik, serta mudah diintegrasikan dengan ruang terbuka hijau. Selain keunggulan teknis, pendekatan nature-based solutions yang melekat pada CW memberikan nilai tambah ekologis dan sosial, termasuk potensi pengelolaan berbasis komunitas yang mendukung keberlanjutan sistem.

Berdasarkan keseluruhan analisis tersebut, CW secara konseptual dinilai layak dan berpotensi besar untuk diterapkan sebagai sistem pengolahan limbah cair permukiman di Kelurahan Pampang Kota Makassar. Dengan pendekatan yang adaptif terhadap kondisi lokal, pelibatan aktif masyarakat, serta integrasi dengan kebijakan sanitasi kelurahan, teknologi ini dapat menjadi solusi alternatif yang berkelanjutan dalam meningkatkan kualitas sanitasi dan lingkungan permukiman. Untuk memperjelas implikasi analisis tersebut dalam konteks teknis dan operasional, sebagai dasar evaluasi komparatif antar tipe system pada **Tabel 4**.

Tabel 4. Kesesuaian dan Kinerja CW untuk Kelurahan Pampang Kota Makassar

Tipe CW	Perkiraaan Kinerja di Kel. Pampang	Kesesuaian Lahan & Operasi	Implikasi Teknis–Lingkungan	Tingkat Kesesuaian	Referensi Ilmiah
Vertical Flow CW (VFCW / VSSF)	BOD: 80-90% COD: 75-90% TSS: >80% NH ₄ ⁺ -N: 50-75%	Lahan relatif terbatas; operasi pasif-semi pasif	Mendukung oksidasi bahan organik dan nitrifikasi; cocok untuk permukiman padat dan beban limbah fluktuatif	Tinggi	[17], [30]
Horizontal Subsurface Flow CW (HSSF)	BOD: 65-80% COD: 60-85% TSS: 80-95% TN: 40-65%	Membutuhkan lahan lebih luas; operasi sederhana	Efektif sebagai unit polishing dan denitrifikasi; sesuai jika tersedia lahan komunal	Sedang-Tinggi	[17], [30]
Hybrid CW (VFCW + HSSF)	BOD: 85-95% COD: 80-95% TSS: 85-95% TN: 60-90%	Modular; dapat dibangun bertahap	Kombinasi zona aerob-anoksik meningkatkan stabilitas efluen dan perlindungan badan air	Sangat Tinggi	[16], [17]

Kesesuaian dan kinerja CW menunjukkan perbedaan karakteristik teknis dan tingkat kesesuaian tiga tipe CW untuk pengolahan limbah cair permukiman di Kelurahan Pampang Kota Makassar. Vertical Flow Constructed Wetlands (VFCW/VSSF) memiliki tingkat kesesuaian tinggi karena mampu mencapai efisiensi penghilangan BOD, COD, dan TSS yang baik dengan kebutuhan lahan relatif kecil serta operasi pasif-semi pasif. Kondisi aerobik mendukung oksidasi bahan organik dan nitrifikasi, sehingga sesuai untuk permukiman padat dengan beban limbah fluktuatif.

Horizontal Subsurface Flow (HSSF) menunjukkan kinerja stabil dalam penyisihan TSS dan nitrogen melalui denitrifikasi, namun memerlukan lahan lebih luas sehingga lebih sesuai sebagai unit *polishing* pada lahan komunal.

Sementara itu, sistem hibrida (VFCW-HSSF) memiliki tingkat kesesuaian sangat tinggi karena integrasi zona aerob-anoksik meningkatkan stabilitas efluen dan perlindungan badan air. Secara keseluruhan, sistem VFCW dan hibrida dinilai paling sesuai diterapkan di Kelurahan Pampang Kota

Makassar, karena mampu mengakomodasi keterbatasan lahan, variasi beban limbah, dan kebutuhan pengelolaan berbasis komunitas secara efektif.

4. Kesimpulan

Berdasarkan kajian literatur dan analisis konseptual, teknologi CW menunjukkan tingkat kesesuaian yang tinggi sebagai sistem pengolahan limbah cair domestik permukiman di Kelurahan Pampang Kota Makassar. Dari aspek teknis, karakteristik limbah cair domestik dengan beban organik moderat dan fluktuasi debit yang relatif stabil memungkinkan CW bekerja secara efektif dalam menurunkan parameter pencemar utama, seperti BOD, COD, TSS, dan nutrien, melalui integrasi proses fisika, kimia, dan biologi yang berlangsung secara alami.

Fleksibilitas desain CW, khususnya pada tipe vertical flow, horizontal subsurface flow, dan sistem hibrida, menjadikannya adaptif terhadap keterbatasan lahan yang umum dijumpai di kawasan permukiman padat. Kebutuhan energi yang rendah, kemudahan operasi, serta biaya pemeliharaan yang relatif kecil memperkuat relevansi CW sebagai alternatif teknologi pengolahan limbah cair yang realistik bagi wilayah dengan keterbatasan sumber daya teknis dan finansial.

Dari aspek sosial dan lingkungan, penerapan CW berbasis vegetasi berpotensi mendorong partisipasi masyarakat, meningkatkan kesadaran lingkungan, serta memberikan manfaat tambahan berupa peningkatan kualitas ruang hijau dan fungsi ekologis permukiman. Secara konseptual, penerapan CW di Kelurahan Pampang Kota Makassar sejalan dengan prinsip sanitasi berkelanjutan dan pendekatan nature-based solutions.

Meskipun demikian, untuk menjamin keberhasilan implementasi jangka panjang, diperlukan penelitian lanjutan melalui studi lapangan dan pengembangan proyek percontohan guna mengevaluasi kinerja aktual sistem, mengoptimalkan desain sesuai kondisi lokal, serta mengkaji aspek sosial, kelembagaan, dan ekonomi secara lebih komprehensif.

5. Referensi

- [1] N. M. Putri and F. Hardiansyah, “Efektivitas Penerapan Teknologi Pada IPAL Komunal Ditinjau dari Parameter BOD, COD, dan TSS,” *J. Tek. Pengair.*, vol. 13, no. 2, pp. 183–194, 2022, doi: 10.21776/ub.pengairan.2022.013.02.05.
- [2] J. Vymazal, “The Historical Development of Constructed Wetlands for Wastewater Treatment,” *Land*, vol. 11, pp. 1–29, 2022, doi: 10.3390/land11020174.
- [3] UN-Water 2021, “Annual Report.” UN-Water, 2022.
- [4] N. Quraini, M. Busyairi, and F. Adnan, “Evaluasi Kinerja Instalasi Pengolahan Air Limbah (Ipal) Komunal Berbasis Masyarakat Kelurahan Masjid Samarinda Seberang,” *J. Teknol. Lingkung. UNMUL*, vol. 6, no. 1, p. 1, 2022, doi: 10.30872/jtlunmul.v6i1.7231.
- [5] Y. Wu and J. Tham, “The impact of environmental regulation, Environment, Social and Government Performance, and technological innovation on enterprise resilience under a green recovery,” *Heliyon*, vol. 9, no. 10, p. e20278, 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e20278.
- [6] F. G.- Avila, L. Valdiviezo-gonzales, S. Iglesias-abad, H. Guti, M. Cadme-galabay, and S. Donosomoscoso, “Results in Engineering Opportunities for improvement in a potabilization plant based on cleaner production : Experimental and theoretical investigations,” *Results Eng.*, vol. 11, pp. 1–14, 2021, doi: 10.1016/j.rineng.2021.100274.
- [7] H. Zhang *et al.*, “A review on China’s constructed wetlands in recent three decades: Application and practice,” *J. Environ. Sci. (China)*, vol. 104, no. June, pp. 53–68, 2021, doi: 10.1016/j.jes.2020.11.032.
- [8] P. Eduardo, R. Alarc, and M. A. G.- Avila, “Chemical Engineering Research and Design Design and performance analysis of a geothermal modular desalination system for sustainable water production,” *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 219, pp. 468–488, 2025, doi: 10.1016/j.cherd.2025.06.018.
- [9] M. Al Khalif, P. Pungut, and S. I. Nezarudin, “Penerapan Teknologi Constructed Wetland (CW) dalam Menurunkan Kadar Cemaran pada Air Limbah Domestik,” *J. Sumberd. Alam dan Lingkung.*, vol. 10, no. 1, pp. 1–11, 2023, doi: 10.21776/ub.jsal.2023.010.01.1.
- [10] F. Alia, P. K. Wardhani, and R. N. Putra, “Analisa Pengaruh Kerapatan Tanaman Terhadap Kinerja Constructed Wetland Pada Pengolahan Limbah Greywater Perumahan,” *Teras J. J. Tek. Sipil*, vol. 13, no. 2, pp. 414–426, 2023, doi: 10.29103/tj.v13i2.875.
- [11] M. A. Ananta, I. Suciana, Y. Izwara, and I. Apriani, “Pengolahan Limbah Cair Rumah Makan Dengan Constructed Wetlands Skala Rumah Tangga,” *J. Teknol. Lingkung. Lahan Basah*, vol. 12, no. 1, p. 237, 2024, doi: 10.26418/jtllb.v12i1.72752.

- [12] W. Sahani and A. M. Alfian, "Kombinasi Constructed Wetland Dan Koagulasi Dalam Menurunkan Kadar BOD Dan TSS Air Limbah Domestik," *Media Kesehat. Politek. Kesehat. Makassar*, vol. 19, no. 1, pp. 48–52, 2024, doi: 10.32382/medkes.v19i1.555.
- [13] F. I. Amalludin, A. Yuniarto, and I. Arliyani, "Kajian Constructed Wetland-Microbial Fuel Cell (CW-MFC) Pengaruh Aerasi pada Air Limbah Domestik," *Al-Ard J. Tek. Lingkung.*, vol. 10, no. 2, pp. 117–130, 2025, [Online]. Available: <http://jurnalsaintek.uinsa.ac.id/index.php/alard/index>
- [14] K. R. Ananda and Z. Zakiah, "Model Pengelolaan Daerah Aliran Sungai (Das) Krueng Aceh Hilir, Sub Das Krueng Jreue Berbasis Nature Based Solution (Nbs)," *J. Green Growth dan Manaj. Lingkung.*, vol. 14, no. 1, pp. 16–25, 2024, doi: 10.21009/jgg.141.02.
- [15] J. Napieralski, A. Guin, and C. Sulich, "Buried but not dead: The impact of stream and wetland loss on flood risk in redlined neighborhoods," *City Environ. Interact.*, vol. 21, pp. 1–14, 2024, doi: 10.1016/j.cacint.2023.100134.
- [16] D. Domínguez-Solís, M. C. Martínez-Rodríguez, H. G. Ramírez-Escamilla, L. E. Campos-Villegas, and R. Domínguez-Solís, "Constructed Wetlands as a Decentralized Treatment Option for Domestic Wastewater: A Systematic Review (2015–2024)," *Water*, vol. 17, no. 10, pp. 1–24, 2025, doi: 10.3390/w17101451.
- [17] E. Sithamparanathan, N. B. Sutton, H. H. M. Rijnaarts, and K. Kujawa-roeleveld, "Controlling Nitrogen Removal Processes in Improved Vertical Flow Constructed Wetland with Hydroponic Materials: Effect of Influent COD/N Ratios," *Water*, vol. 15, pp. 1–15, 2023, doi: doi.org/10.3390/w15061074.
- [18] G. Rusmayadi, "Teknologi Alternatif Mengolah Air Limbah dengan Media Tanaman," *SABAJAYA J. Pengabdi. Kpd. Masy.*, vol. 1, no. 3, pp. 14–21, 2023, doi: 10.59561/sabajaya.v1i3.35.
- [19] N. Carabal, M. Segura, E. Puche, C. Rojo, and M. A. Rodrigo, "How the diversity of constructed wetlands improves the plankton communities discharged into a protected Mediterranean wetland," *Hydrobiologia*, vol. 851, no. 1, pp. 243–259, 2024, doi: 10.1007/s10750-023-05331-2.
- [20] S. Ricart and A. M. Rico-amor, "Constructed Wetlands to Face Water Scarcity and Water Pollution Risks: Learning from Farmers' Perception in," *Water*, vol. 13, pp. 1–12, 2021, doi: 10.3390/w13172431.
- [21] T. Melinda and M. Majdi, "Analysis of BOD, COD and TSS Levels in Domestic Liquid Waste (Greywater) in Households in Bada Village, Dompu Regency," *J. Pijar MIPA*, vol. 20, no. 4, pp. 626–631, 2025.
- [22] F. Novia, E. Herliana, and J. Saepurrohman, "Analisis Efisiensi Kinerja Kolam Stabilisasi Pada Instalasi Pengolahan Air Limbah Domestik Bojongsoang Kabupaten Bandung Jawa Barat," *JSE J. Serambi Eng.*, vol. IX, no. 4, pp. 10922–10928, 2024.
- [23] F. Saadatinavaz, M. A. Alomari, M. Ali, and P. E. Saikaly, "Striking a Balance: Decentralized and Centralized Wastewater Treatment Systems for Advancing Sustainable Development Goal 6," *AAdvanced Energy Sustain. Res.*, vol. 5, pp. 1–9, 2024, doi: 10.1002/aesr.202400097.
- [24] M. Rahayu, Y. Noradika, J. D. Prasetya, and E. Muryani, "Partisipasi Masyarakat Kampung Iklim Dalam Upaya Mitigasi dan Pengendalian Banjir di Kelurahan Rawajati, Kecamatan Pancoran, Jakarta Selatan, DKI Jakarta," *J. Green Growth dan Manaj. Lingkung.*, vol. 15, no. 1, pp. 48–60, 2025, doi: 10.21009/jgg.151.03.
- [25] I. Arliyani, T. Noori, M. I. Ammarullah, B. V. Tangahu, S. Mangkoedihardjo, and B. Min, "RSC Advances Constructed wetlands combined with microbial for leachate treatment and power generation," *RSC Adv.*, vol. 14, pp. 32073–32100, 2024, doi: 10.1039/d4ra04658g.
- [26] J. Harahap, A. S. Yuri, and B. Ishak, "Perencanaan Constructed Wetland sebagai Alternatif Pengolahan Air Limbah Domestik di Perumahan Lam trieng Madani Kabupaten Aceh Besar," *AMINA*, vol. 5, no. 1, pp. 1–10, 2023.
- [27] A. Hasan and H. Kadarusman, "Rumah Sakit Dengan Metode Constructed Wetland," *J. Kesehat. Lingkung. Ruwa Jurai*, vol. 16, no. 1, pp. 41–49, 2022.
- [28] P. LH-BPLH, "Peraturan Menteri LH-BPLH 11 Tahun 2025, tentang Baku Mutu Air Limbah dan Standar Teknologi Pengelolaan Untuk Air Limbah Domestik." RI, pp. 1–36, 2025.
- [29] A. Wulandari, R. W. Nusantara, and M. S. Anwari, "Efektivitas Sistem Lahan Basah Buatan Dalam Pengolahan Limbah Cair Rumah Sakit-X," *J. Mns. dan Lingkung.*, vol. 27, no. 2, p. 39, 2020, doi: 10.22146/jml.52179.
- [30] S. Singh *et al.*, "Assessment of pathogen removal efficiency of vertical flow constructed wetland treating septage," *Sci. Rep.*, pp. 1–9, 2023, doi: 10.1038/s41598-023-45257-2.

-
- [31] A. Masharqa, S. Al-tardeh, R. Mlih, and R. Bol, "Vertical and Hybrid Constructed Wetlands as a Sustainable Technique to Improve Domestic Wastewater Quality," *Water*, vol. 15, pp. 1–21, 2023.
 - [32] A. Nuraini and F. D. Indarti, "Inovasi Arsitektur Hijau dengan Sistem Pengolahan Air Limbah Terintegrasi dalam Upaya Penyediaan Sanitasi Layak di Kawasan Perkotaan Semarang," *Semnas*, vol. 7, pp. 975–985, 2024.
 - [33] Z. Rahayu, W. D. Rahmayanti, S. P. Tanjaya, and N. P. Utami, "Jurnal Biologi Tropis Potential of Therapeutic Ethanolic Extract of Flavonoids Muntingia Calabura on Alloxan-induced Diabetic Male *Mus musculus*," *J. Biol. Trop.*, vol. 25, no. 2, pp. 1549–1556, 2025.