

STUDI LITERATUR EFEKTIVITAS *CONSTRUCTED WETLANDS* SISTEM RESIRKULASI UNTUK PENGOLAHAN AIR LIMBAH

P.P Putra^{1*}, J.S.M Ahmad¹, N.N.N. Marleni¹

¹Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, INDONESIA

*Corresponding author: panduperdanaputra@mail.ugm.ac.id

INTISARI

Constructed wetland merupakan salah satu teknologi pengolahan air limbah berbasis ekosistem alami yang semakin banyak dikembangkan sebagai solusi ramah lingkungan. Namun, sistem *constructed wetland* konvensional memiliki beberapa keterbatasan, seperti efisiensi pengolahan yang tidak stabil, waktu tinggal yang terbatas, serta ketergantungan pada kondisi lingkungan. Untuk mengatasi hal tersebut, berbagai penelitian dalam rentang tahun 2015-2025 telah mengeksplorasi penerapan sistem resirkulasi dalam *constructed wetland*. Penelitian ini bertujuan untuk menyusun kajian literatur sistematis mengenai pengaruh resirkulasi dalam *constructed wetland* terhadap efisiensi penghilangan parameter pencemar utama, yaitu BOD, COD, NH₄⁺, NO₂⁻, NO₃⁻, dan PO₄³⁻, dan juga mengidentifikasi kelebihan dan kekurangan sistem resirkulasi. Hasil tinjauan menunjukkan bahwa sistem resirkulasi mampu meningkatkan efisiensi penghilangan polutan organik dan nutrien, secara signifikan, dengan kinerja yang lebih stabil sepanjang waktu. Selain itu Proses resirkulasi memperbaiki suplai oksigen dalam media, Dapat mereduksi beban toksik pada air limbah, serta dapat mengurangi kebutuhan luas lahan yang diperlukan. Namun, sistem ini juga memiliki kekurangan, seperti memerlukan energi tambahan untuk mengoperasikan pompa yang berisiko meningkatkan biaya operasional, serta memiliki potensi penyumbatan yang lebih tinggi.

Kata kunci: *Constructed wetlands*, Fitoremediasi, Resirkulasi limbah, Pengolahan air limbah

1. LATAR BELAKANG

Air merupakan salah satu sumber daya alam yang memiliki peran penting untuk kelangsungan hidup makhluk hidup. Namun air juga dapat menyebabkan malapetaka apabila kualitas dan kuantitasnya buruk. Menurunnya kualitas dan kuantitas air ini tidak lain dapat disebabkan oleh kegiatan manusia itu sendiri. Air limbah adalah sisa air yang dibuang berasal dari buangan rumah tangga, industri, maupun tempat-tempat umum lainnya dan pada umumnya mengandung bahan-bahan atau zat-zat yang sangat membahayakan kesehatan manusia dan mengganggu lingkungan hidup (Panambunan *et al.* 2017) dalam (Sasiang *et al.* 2019). Untuk menghindari hal tersebut maka diperlukan perencanaan sistem pengolahan air limbah agar dapat mengatasi permasalahan lingkungan. Beberapa teknologi yang umum digunakan dalam pengolahan air limbah antara lain teknologi membran, lumpur aktif (*activated sludge*), *Advanced Oxidation Processes* (AOP), fitoremediasi, dan *electrocoagulation*. Salah satu pengolahan air limbah yang murah dan ramah lingkungan karena memanfaatkan tanaman hidup untuk menghilangkan, menguraikan, atau menstabilkan polutan dari tanah, air, atau udara secara alami dan berkelanjutan adalah dengan fitoremediasi. Metode fitoremediasi yang paling umum dan sering digunakan dalam pengolahan air limbah adalah *Constructed Wetland* (CW).

CW merupakan pengolahan air limbah berbasis ekologi yang meniru proses alami dalam menyaring dan mengurai polutan melalui interaksi antara tanaman air, mikroorganisme, media substrat, dan aliran air. Menurut (Kadlec dan Wallace, 2009) dalam (Qomariyah *et al.* 2017), CW merupakan proses memperbaiki kualitas air dengan menyisihkan polutan yang terkandung di dalam air limbah melalui proses fisik (penyaringan dan sedimentasi), proses biologi (pertumbuhan mikroba dan tanaman air), dan proses mekanik sebagai sistem pengolahan limbah cair yang menirukan proses alam dalam memperbaiki kualitas air. CW yang disebut sebagai “black boxes” sebagai sistem yang kompleks dan sulit dipahami karena proses fisik, biologi, mekanik dan bahkan kimia terjadi secara aktif dan masing-masing komponen saling mempengaruhi (Langergraber 2013). CW merupakan contoh nyata dari teknologi hijau dalam pengolahan limbah. Dengan memadukan efisiensi, keberlanjutan, dan dampak lingkungan yang rendah, sistem ini menjadi solusi alternatif yang potensial, khususnya untuk daerah-daerah yang ingin menerapkan pendekatan ekologis dan berkelanjutan dalam pengelolaan limbah.

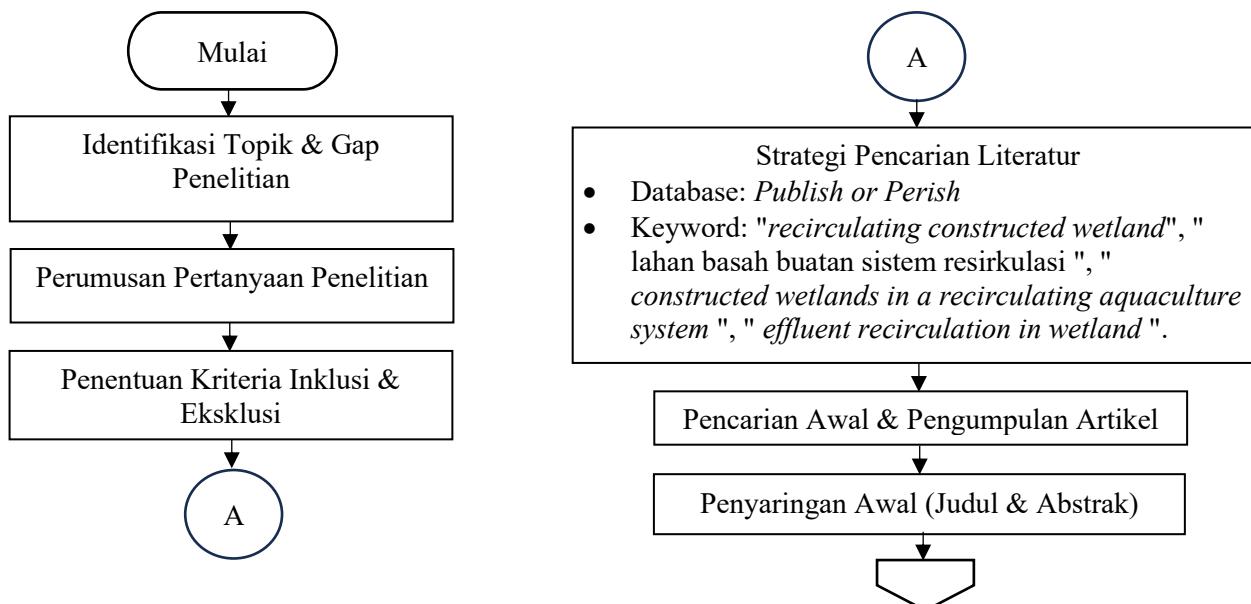
Meskipun CW telah banyak digunakan karena keunggulannya, teknologi ini tetap memiliki sejumlah kekurangan yang membatasi efektivitasnya. Menurut (Reed *et al.*, 1995; Kadlec and Knight, 1996) dalam (Akratos dan Tsihrintzis 2007) *Dissolved oxygen* (DO) dalam CW HSSF seringkali <1 mg/L, sehingga nitrifikasi tidak berjalan optimal. Salah satu pendekatan inovatif yang muncul untuk mengatasi kekurangan tersebut adalah penerapan resirkulasi, yaitu pengembalian sebagian atau seluruh air efluen ke dalam sistem CW untuk diolah kembali. Resirkulasi pada CW

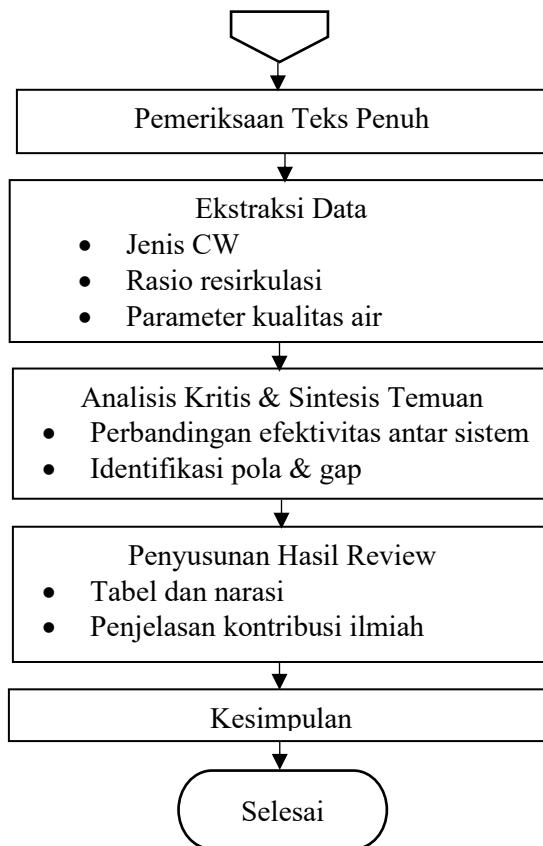
diyakini mampu meningkatkan efisiensi penghilangan polutan, seperti bahan organik, nitrogen, dan fosfor dengan cara memperpanjang waktu kontak antara polutan dan agen bioremediasi alami di dalam sistem. Resirkulasi limbah kembali ke area influen menyebabkan efek pengenceran, yang mengurangi toksisitas influen dengan konsentrasi polutan yang tinggi terhadap aktivitas mikroba, yang juga akan diintensifkan oleh mikroorganisme dalam aliran resirkulasi. Aliran resirkulasi juga meningkatkan transportasi DO dalam CW dan meningkatkan efisiensi penghilangan polutan yang mengandung komponen organik dan nitrogen (Jung *et al.* 2020).

Meskipun berbagai penelitian telah mengevaluasi efektivitas sistem resirkulasi dalam CW, sebagian besar fokusnya masih terbatas pada peningkatan penghilangan parameter organik seperti BOD, COD, serta nitrogen. Sebaliknya, pengaruh resirkulasi terhadap efisiensi penghilangan fosfat masih kurang mendapat perhatian, padahal fosfat merupakan salah satu penyumbang utama eutrofikasi di badan air. Melalui tinjauan ini, penulis bertujuan untuk menyusun kajian literatur sistematis mengenai pengaruh resirkulasi dalam CW terhadap efisiensi penghilangan parameter pencemar utama, yaitu BOD, COD, NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , dan PO_4^{3-} . Selain itu, penulis juga mengidentifikasi kelebihan dan kekurangan sistem resirkulasi untuk mengevaluasi tantangan operasional yang dapat muncul dalam implementasi skala lapangan, seperti kebutuhan energi tambahan, risiko penyumbatan, dan kestabilan performa jangka panjang. Dengan menyajikan temuan ini secara kritis, penulis berharap dapat menyediakan informasi ilmiah yang relevan dan aplikatif sebagai dasar dalam merancang sistem CW yang lebih efisien, adaptif, dan sesuai dengan karakteristik beban pencemar, sehingga teknologi ini dapat dioptimalkan untuk mendukung pengelolaan air limbah yang ramah lingkungan dan berkelanjutan.

2. METODE

Pada penulisan artikel ini metode penelitian yang digunakan adalah pendekatan tinjauan pustaka atau *literature review*. Tinjauan atau *review* berkaitan dengan proses penilaian atau analisis yang bersifat kritis terhadap buku, pertunjukan atau pekerjaan yang juga meliputi jurnal maupun artikel penelitian (Heryana 2021). Selanjutnya pustaka dalam konteks akademis dan penelitian, sering merujuk pada sumber informasi tertulis, baik itu buku, jurnal, artikel, maupun dokumen lainnya yang digunakan sebagai referensi atau bahan kajian. Sehingga dapat disimpulkan tinjauan pustaka atau *literature review* adalah suatu proses yang berpusat pada pengkajian mendalam terhadap topik tertentu yang menarik untuk diteliti. Selanjutnya (Wahyuni dan Ganesha, 2022) dalam (Yaasmin 2024) menjelaskan bahwa kajian pustaka merupakan kegiatan yang berfokus pada sebuah topik spesifik yang menjadi minat untuk dianalisis secara kritis. Berbagai hasil buahan pustaka atau sumber literatur yang diperoleh dari beragam referensi kemudian dikaji secara teliti dan menyeluruh (Adlini *et al.* 2022). Pengkajian ini dilakukan dengan pendekatan kritis dan mendalam, dengan tujuan untuk memperkuat argumen dan ide-ide yang diajukan dalam penelitian. Tinjauan sistematis dilakukan dengan mengumpulkan literatur dari *Publish or Perish* dalam rentang 10 tahun terakhir. Kata kunci yang digunakan untuk mencari literatur dalam penelitian ini adalah *recirculating constructed wetland*, lahan basah buatan sistem resirkulasi, *constructed wetlands in a recirculating aquaculture system*, *effluent recirculation in wetland*. Diagram alir penelitian dapat dilihat pada Gambar 1. berikut ini.



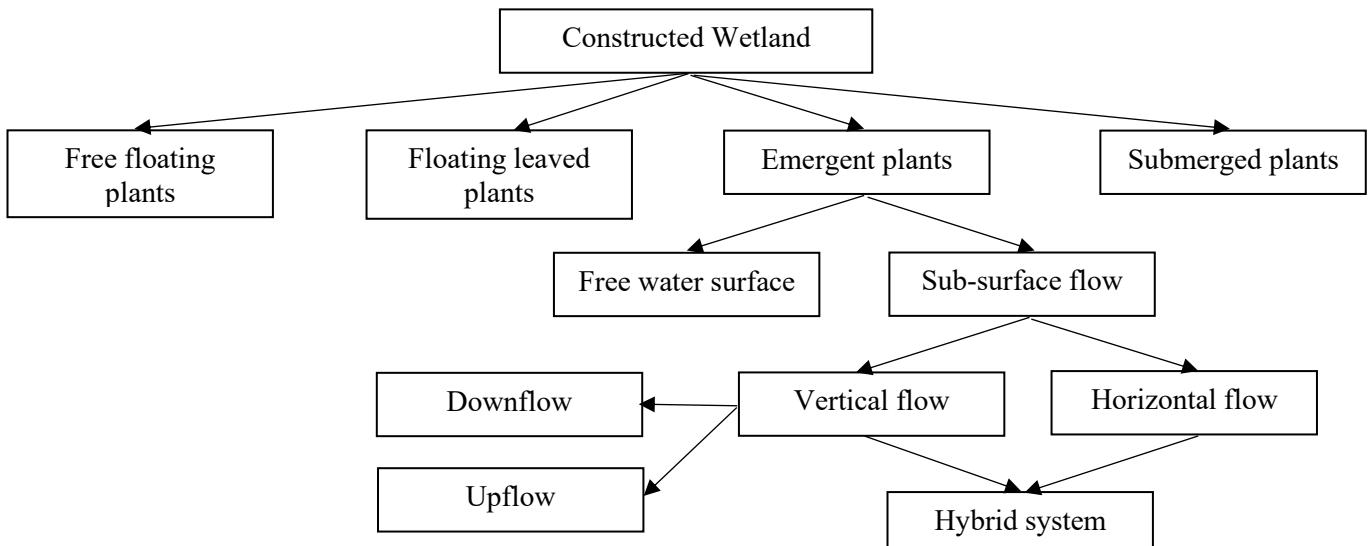


Gambar 1. Diagram alir penelitian

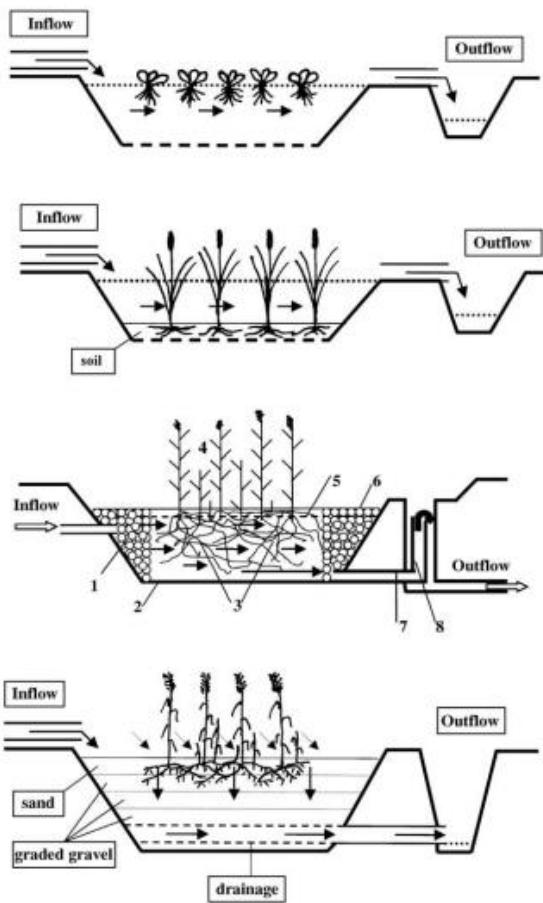
3. PEMBAHASAN

3.1 Penjelasan Umum

Sistem pengolahan CW adalah sistem rekayasa yang telah didisain dan dibangun dengan memanfaatkan proses alamiah yang melibatkan tumbuhan, tanah, dan kumpulan mikrobia yang saling berhubungan untuk membantu pengolahan limbah cair (Vymazal, 1998) dalam (Vymazal 2007). CW dapat diklasifikasikan berdasarkan pada jenis tumbuhan makrofita dan klasifikasi lebih lanjut didasarkan pada rezim aliran air (Gambar. 1).



Gambar 2 Klasifikasi lahan basah buatan untuk pengolahan air limbah (Vymazal, 2001) dalam (Vymazal 2007).



Gambar 3 Lahan basah buatan untuk pengolahan air limbah (dari atas ke bawah): CW dengan tumbuhan yang mengapung bebas (FFP), CW dengan permukaan air bebas dan makrofit yang muncul (FWS), CW dengan aliran bawah permukaan horizontal (HSSF, HF), CW dengan aliran bawah permukaan vertikal (VSSF, VF) (berdasarkan Vymazal, 2001) dalam (Vymazal 2007).

Berdasarkan rezim aliran air dan posisi tanaman dalam sistem, terdapat beberapa tipe utama CW yang umum digunakan, yaitu: *free-floating plant systems*, *free water surface (FWS) wetlands* dengan tanaman emergen, serta *sub-surface flow (SSF) wetlands* yang terbagi menjadi dua jenis berdasarkan arah aliran yaitu *horizontal subsurface flow (HSSF)* dan *vertical subsurface flow (VSSF)*. Perbedaan karakteristik dari masing-masing sistem ini, baik dari segi jalur aliran, kedalaman media tanam, hingga posisi tanaman terhadap permukaan air, memberikan pengaruh yang berbeda terhadap efisiensi penghilangan polutan. Ilustrasi visual dari konfigurasi-konfigurasi tersebut disajikan pada Gambar 3 untuk memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai struktur dan mekanisme kerja masing-masing sistem.

Untuk meningkatkan efisiensi sistem CW, berbagai pendekatan inovatif telah dikembangkan. Salah satu pendekatan yang umum digunakan dan akan dibahas pada *literature review* ini adalah resirkulasi aliran, di mana sebagian efluen dialirkan kembali ke bagian inlet untuk memperpanjang waktu tinggal dan meningkatkan interaksi antara air limbah dengan media substrat, sehingga proses biodegradasi dan transformasi nutrien dapat berlangsung lebih optimal. Selain itu, aerasi buaan juga menjadi metode populer, yaitu dengan menambahkan oksigen ke dalam sistem secara aktif untuk meningkatkan proses oksidasi senyawa organik dan mempercepat nitrifikasi. Pendekatan lainnya adalah penggunaan sistem hybrid, yaitu gabungan antara CW aliran horizontal dan vertikal, yang memungkinkan penghilangan berbagai parameter pencemar secara lebih efektif melalui pengaturan zona aerobik dan anaerobik. Penggunaan media substrat yang inovatif seperti zeolit, pasir besi, atau bahan berbasis aluminium juga mulai digunakan karena memiliki kemampuan adsorpsi yang tinggi, terutama untuk senyawa fosfat. Pendekatan-pendekatan ini dapat meningkatkan efisiensi pengolahan CW dalam berbagai studi, dan menjadikan sistem CW lebih adaptif terhadap variasi beban pencemar serta lebih andal untuk implementasi jangka panjang.

3.2 Pengaruh Resirkulasi Terhadap Penurunan Parameter Pencemar

3.2.1 Penurunan COD dan BOD

Chemical Oxygen Demand (COD) adalah parameter utama dalam menentukan tingkat pencemaran air limbah. COD mengukur jumlah oksigen yang dibutuhkan untuk mengoksidasi senyawa organik dalam air. Kadar COD yang tinggi menunjukkan banyaknya bahan pencemar organik yang belum terurai, yang dapat menyebabkan penurunan kualitas air dan gangguan ekosistem perairan. Keberadaan COD dengan nilai yang tinggi akan berdampak pada defisit oksigen dalam air sungai sehingga bisa mengakibatkan kematian pada ikan dan tumbuhan air. Nilai COD tinggi mengindikasikan bahwa air tercemar (Idrus dan Dewa 2017). Apabila suatu perairan dikatakan tercemar, hal ini menandakan juga akan semakin sulit mendapatkan air sungai yang memenuhi kriteria sebagai bahan baku air minum.

(Wang *et al.* 2024) menggunakan VF-CW untuk mengolah air limbah akuakultur dengan menggunakan tanaman *Ischaemum Muticum*. Dalam penelitiannya dikatakan bahwa seiring dengan peningkatan *Hydraulic Retention Time* (HRT), konsentrasi COD tetap relatif stabil, sedangkan laju penghilangan COD menunjukkan peningkatan awal yang diikuti oleh penurunan dengan HRT optimal untuk menghilangkan COD adalah 6 jam memiliki rata-rata tingkat penghilangan sebesar 29,16%. Saat HRT melebihi 6 jam, keberadaan air limbah dalam sistem terlalu lama, menyebabkan keadaan anoksik dan mengurangi kemampuan aerobik mikroorganisme untuk mendegradasi COD, yang menyebabkan penurunan laju penghilangan COD. Dalam penelitian lain yang dilakukan oleh (Erwin *et al.* 2017), penggunaan SSF-CW yang ditanami *Cyperus rotundus* untuk mengolah air limbah domestik dengan waktu tinggal 2,4,6, dan 8 hari. Waktu tinggal terbaik yang paling efektif untuk menurunkan kadar COD adalah 4 hari dengan persentase penghilangan sebesar 94,79% dan terendah pada waktu tinggal 6 hari (83,98%).

Menurut penelitian oleh (Baggiotto *et al.* 2025), resirkulasi pada sistem *Septic Tank* (ST) dan VFCW menggunakan tanaman *Canna x generalis* untuk mengolah ar limbah domestik dengan laju beban hidrolik (HLR) 90 mm d⁻¹ dapat menghilangkan COD sebesar 88%, sedangkan pada VFCW menggunakan saturasi parsial tanpa resirkulasi mampu mereduksi COD rata-rata sebesar 93%. (Herrera *et al.* 2023) menyebutkan bahwa rata-rata penghilangan COD dari air limbah domestik di *pond* selalu lebih tinggi daripada di *hybrid CW* yang ditanami *Phragmites*, *Cyperus*, *Pontederia*, *Canna* dan *Typha*, namun penghapusan COD untuk sistem lengkap (*pond+CW*) meningkat secara progresif dari 59% dengan 0% Rr, menjadi 61% dengan 50% Rr, dan menjadi 66% dengan 100% Rr. Dalam penelitian oleh (Yang *et al.* 2021) menggunakan VSSF CW menggunakan beberapa tanaman seperti *Canna indica*, *Phragmites australis*, dan *Cyperus involucratus* untuk mengolah air lindi TPA. Resirkulasi limbah CW dengan 25% Rr dapat mencapai efek pengolahan yang optimal pada bahan organik dengan penghilangan COD sebesar 86,3%. (Ayaz *et al.* 2015) menyebutkan bahwa berdasarkan dari tipe CW, efisiensi penghilangan bahan organik sedikit lebih tinggi pada *Vertical Sub-Surface Flow Wetland* dibandingkan dengan *Horizontal Sub-Surface Wetland* dalam penghilangan COD.

Biochemical Oxygen Demand (BOD) adalah indikator penting yang menunjukkan jumlah oksigen terlarut yang dibutuhkan oleh mikroorganisme untuk menguraikan bahan organik dalam air limbah secara biologis. Nilai BOD yang tinggi menandakan tingkat pencemaran organik yang tinggi dan dapat menyebabkan penurunan kadar oksigen di perairan, memicu eutrofikasi, dan mengganggu kehidupan organisme akuatik. (Herrera-Melián, Guedes-Alonso, Tite-Lezcano, *et al.* 2023) menyebutkan bahwa penghilangan keseluruhan dalam kasus BOD meningkat dari 90% tanpa resirkulasi menjadi 96% dengan 50 dan 100% Rr. (Jung *et al.* 2020) menyatakan bahwa HSSF CW dengan aerasi dan resirkulasi menggunakan tanaman *Hydrocotyle verticillata Thunb* secara signifikan meningkatkan efisiensi penghilangan BOD pada air limbah kampus dan industri dari 53,8 – 76,0% menjadi 82 – 91,7% dan menurunkan konsentrasi BOD hingga di bawah 10 mg L⁻¹.

(Baggiotto *et al.* 2025) dalam penelitiannya, ketika sistem dioperasikan dengan drainase dan resirkulasi bebas, dengan beban masuk sebesar 35,8 g BOD m⁻²day⁻¹, efisiensi penghilangan keseluruhan sistem (ST + VFCW) adalah 88 %. Ketika resirkulasi dihentikan, dengan beban masuk 26,7 g BOD m⁻²day⁻¹, reduksi rata-rata sistem (ST + VFCW) mencapai 97 %. Dengan fokus hanya pada VFCW pada fase terakhir ini, penghilangan BOD mencapai 92 %. (Santos *et al.* 2024) dalam penelitiannya juga menyebutkan sistem dengan resirkulasi menunjukkan sedikit penurunan efisiensi dibandingkan dengan tanpa resirkulasi, terutama karena dalam sistem dengan resirkulasi, bahan organik yang mudah terurai secara hayati lebih sedikit. Fakta ini terjadi akibat tercampurnya antara air limbah yang sudah diolah dengan air limbah yang masuk ke dalam sistem. Dengan demikian, CW dengan sistem resirkulasi merupakan solusi yang potensial, namun efektivitasnya tidak selalu optimal secara universal. Oleh karena itu, diperlukan penyesuaian desain dan pemantauan yang ketat agar sistem dapat berfungsi secara efektif sesuai dengan

kondisi spesifik di lapangan. Dukungan penelitian lokal yang berbasis pada karakteristik limbah dan lingkungan setempat juga sangat diperlukan untuk memastikan sistem ini mampu menurunkan kadar COD dan BOD hingga mencapai ambang baku mutu yang diizinkan.

3.2.2 Penurunan Amonium, Nitrit, dan Nitrat

Amonium adalah kation poliatomik bermuatan positif dengan rumus kimia $\text{NH}_4^+ - \text{N}$. Senyawa ini terbentuk dari protonasi amonia. Amonium sering ditemukan dalam air limbah dan merupakan hasil dari degradasi senyawa nitrogen organik. Tanaman akan menyerap unsur hara N melalui akar. Jika sumber nitrogen yang tersedia adalah ion amonium dan ion nitrat, tanaman akan lebih suka menyerap ion amonium (Fang et al., 2007 dalam Oktaviyani et al., 2024). Hal ini karena energi yang dibutuhkan untuk mengasimilasi ion amonium lebih rendah daripada nitrat (Wetzel, 2001 dalam Oktaviyani et al., 2024). Menurut (Saeed et al. 2021) HF-CW kedalaman air dangkal mampu menghasilkan outlet limbah dengan konsentrasi $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ yang rendah yaitu, 19-23 mg/L dan 2-6 mg/L selama periode tanpa dan dengan resirkulasi limbah, masing-masing persentase penghilangan berkisar antara 70-79% dan 71-92%. SF-CW juga menunjukkan penghilangan $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ yang signifikan (konsentrasi limbah: 5-50 mg/L; persentase penghilangan: 70-86%) dalam tiga periode operasional yang disertai dengan peningkatan penghilangan $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ selama resirkulasi limbah. (Baggiotto et al. 2025) dalam penelitiannya menyatakan bahwa efisiensi penghilangan $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ pada ST + VFCW dengan resirkulasi limbah dan saturasi parsial memiliki persentase lebih tinggi (79%) dibanding tanpa resirkulasi (61%). (Herrera-Melián, Guedes-Alonso, Tite-Lescano, et al. 2023) Dalam operasi normal (tanpa resirkulasi limbah), kombinasi kolam dan CW sangat efisien dalam menghilangkan zat farmasi karena mencapai 86% penghilangan rata-rata. Resirkulasi sebesar 100% meningkatkan efisiensi penghilangan amonium secara signifikan hingga mencapai 97%. (Yang et al. 2021) menggunakan CW sistem aliran bawah permukaan vertikal dengan resirkulasi limbah (rasio 1:4) untuk mengolah air lindi mampu menghasilkan 86,7% penghilangan $\text{NH}_4^+ - \text{N}$.

(Wang et al. 2024) menyebutkan tingkat penghilangan $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ berfluktuasi, pertama meningkat dan kemudian menurun seiring adanya peningkatan HRT dengan HRT paling optimal adalah 6 jam mampu menghilangkan $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ sebesar 16,02%. Ketika HRT terlalu pendek, nitrifikasi dan denitrifikasi tidak dapat dilakukan sepenuhnya. Dengan memperpanjang HRT, waktu reaksi nitrifikasi terpenuhi, dan penyerapan dan pemanfaatan tanaman ditingkatkan, sehingga meningkatkan efisiensi penghilangan nitrogen. Namun, ketika HRT optimal 6 jam terlampaui, oksigen di lahan basah buatan tidak mencukupi, dan kolam budidaya udang terus menerus menghasilkan polutan. Sejalan dengan penelitian oleh(Herrera-Melián, Guedes-Alonso, Tite-Lezcano, et al. 2023), CW dengan sistem resirkulasi mampu menurunkan kadar $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ sebesar 16-17%. Untuk sistem laguna makrofita dengan CW dalam penghilangan $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ pada periode tanpa resirkulasi sangat rendah dan bervariasi, ini menunjukkan rendahnya kandungan DO pada sistem tersebut, karena seluruhnya tertutup oleh makrofita, sehingga efek naungannya meminimalkan aktivitas fotosintesis mikroalga. Ketika 50% Rr diterapkan, Penghapusan $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ meningkat menjadi 30 (± 19) %, namun peningkatan ini tidak signifikan dibanding dengan 100% Rr, Penghapusan $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ lebih stabil dan meningkat secara signifikan hingga 55 (± 6)%.. Oleh karena itu resirkulasi merupakan alternatif yang tepat karena aliran resirkulasi juga meningkatkan transportasi DO dalam CW dan meningkatkan pembuangan polutan yang mengandung organik dan nitrogen (Jung et al. 2020). Dari tipe CW, (Ayaz et al. 2015) menyebutkan bahwa efisiensi penghapusan untuk $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ jauh lebih tinggi pada VSSF-CW ($67.9 \pm 29.6\%$) dibanding dengan HSSF-CW ($13.1\% \pm 9.0\%$). Efisiensi penghilang amonium yang lebih tinggi di VSSF-CW disebabkan oleh nitrifikasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan HSSF-CW.

Nitrit (NO_2^-) adalah senyawa antara dalam siklus nitrogen, terbentuk dari proses nitrifikasi parsial (oksidasi $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ menjadi NO_2^-) dan merupakan tahap sebelum nitrat (NO_3^-). Nitrit dapat meningkat akibat dari produk intermediet antara nitrifikasi dan denitrifikasi. Nitrat (NO_3^-) berasal dari aktifitas bakteri nitrobacter atau nitrosomonas dalam mengubah NH_4^+ melalui NO_2^- menjadi NO_3^- . NO_3^- yang terbentuk dimanfaatkan oleh plankton sebagai unsur hara nitrogen dalam kolam. Namun demikian dalam kondisi budidaya intensif biasanya pembentukan NO_3^- lebih cepat dari pada penyerapan oleh plankton, sehingga NO_3^- akan menumpuk dan berpotensi terjadi reaksi balik yang memicu pembentukan NO_2^- (dalam kondisi minim oksigen). Untuk proses nitrifikasi dan denitrifikasi, reaksi teoritis dapat dinyatakan dalam persamaan berikut (Saeed and Sun, 2012; Vymazal, 207) dalam (Jung et al. 2020):



Berdasarkan persamaan (1) dan (2), (Jung *et al.* 2020) mengartikan bahwa $\text{NH}_3^+ - \text{N}$ yang dikonsumsi dan nitrogen yang dikeluarkan adalah 1:1. Untuk kedua sistem, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ dari proses nitrifikasi memberikan kontribusi penghilangan TN sebesar 91,5–98,0% untuk reaktor HSSF dengan aerasi; resirkulasi dan 70,5–98,1% untuk reaktor kontrol. Hal ini menyiratkan bahwa nitrifikasi dan denitrifikasi merupakan mekanisme utama yang berpengaruh atas penghilangan nitrogen. Dalam penelitian lain yang dilakukan oleh (Wang *et al.* 2024) laju penghilangan $\text{NO}_2^- - \text{N}$ meningkat seiring dengan meningkatnya kepadatan tanaman. (Jung *et al.* 2020) menyebutkan kisaran rata-rata konsentrasi $\text{NO}_2^- - \text{N}$ adalah 0,057–0,424 mg L⁻¹ di tangki influen, 0,009–0,147 mg L⁻¹ di effluent tangki kontrol, dan 0,021–0,027 mg L⁻¹ di effluent HSSF-CW baik di resirkulasi dengan aerasi maupun tidak. Konsentrasi $\text{NO}_2^- - \text{N}$ yang rendah ini tidak menunjukkan adanya akumulasi di sistem CW. Secara umum, Nitrosomonas adalah mikroorganisme yang bertanggung jawab atas transformasi $\text{NH}_3^+ - \text{N}$ menjadi $\text{NO}_2^- - \text{N}$, yang kemudian diubah menjadi $\text{NO}_3^- - \text{N}$ oleh Nitrobacter. Nitrobacter tumbuh hampir dua kali lebih cepat daripada Nitrosomonas jika tidak dihambat dan dibatasi. (Jung *et al.* 2020) dalam penelitiannya menyebutkan bahwa sistem aerasi dan resirkulasi internal menghasilkan DO yang tinggi, yang menekan denitrifikasi dan mengakibatkan akumulasi $\text{NO}_3^- - \text{N}$. (Oktaviyani *et al.* 2024) Penggunaan *Floating Treatment Swamp* (FTW) pada sistem *Recirculating Aquaculture System* (RAS) memiliki persentase penghilangan nitrat sebesar 83,85%. (Wang *et al.* 2024) dalam penelitiannya menyebutkan bahwa efek penghilangan $\text{NO}_3^- - \text{N}$ tidak stabil, dengan laju penghilangan tertinggi mencapai 21,50% dalam 20 hari pertama dari 60 hari. (Haddaji *et al.* 2019) menyatakan peningkatan kecil diamati setelah 3 jam sirkulasi pertama diikuti oleh penurunan selama perlakuan. Eliminasi nitrat dalam reaktor kontrol (tanpa tanaman) tidak melebihi $20 \pm 1,21\%$. Namun, NO_3^- melalui HFCW dengan resirkulasi limbah menurun drastis, efisiensi penghilangan mencapai rata-rata $92 \pm 0,34\%$.

3.2.3 Penurunan Fosfat

Fosfat (PO_4^{3-}) merupakan bentuk utama fosfor yang terlarut dalam air limbah dan menjadi nutrien esensial bagi pertumbuhan tanaman. Fosfor pada kolam perikanan berasal dari sisa pakan yang tidak dikonsumsi oleh ikan, feses ikan, dan sisa metabolisme ikan berupa fosfat. Fosfat merupakan senyawa yang secara alami diperlukan dalam ekosistem untuk mendukung pertumbuhan tanaman dan mikroorganisme. Namun, dalam jumlah yang berlebihan terutama sebagai hasil dari limbah industri, pertanian, dan rumah tangga, fosfat dapat menimbulkan berbagai dampak negatif yang serius terhadap lingkungan dan kesehatan manusia. (Oktaviyani *et al.* 2024) menyebutkan penggunaan *Vetiveria zizanoides* di kolam *Floating Treatment Wetland* (FTW) dengan pot berisi media *rock wool* pada sistem *Recirculating Aquaculture System* (RAS) dengan HRT 2 hari mampu menurunkan fosfat pada air limbah kolam ikan lele sebesar 61,46%. Menurut (Erwin *et al.* 2017) CW sistem resirkulasi dengan media pasir dan ketikil berukuran 2-3 cm dapat menurunkan kadar fosfat paling optimal pada variasi waktu tinggal 4 hari dengan 82,24% dan dengan waktu tinggal 2 hari menunjukkan persentase paling rendah dengan 76,06%. (Rakhmatika *et al.* 2017) dalam penelitiannya menggunakan FWS-CW dan SSF-CW yang ditanami *Echinodorus palaefolius* media kerikil 10 cm dan pasir 5 cm untuk mengolah air limbah domestik dengan HRT 5 hari. Hasil yang didapatkan dari penelitian tersebut, bahwa penghilangan fosfat untuk tipe FWS-CW dan SSF-CW tidak memiliki perbedaan nilai yang signifikan. FWS-CW mampu menghilangkan kadar fosfat dengan persentase 69,07% dan pada SSF-CW sebesar 71,86%. SSF-CW memiliki keunggulan dan efektivitas yang lebih baik dibandingkan FWS-CW, meskipun tidak signifikan. Sistem ini mengalirkan air limbah melalui bagian bawah media, sehingga penyaringan berlangsung lebih optimal. SSF-CW juga cocok digunakan sebagai tahap pengolahan sekunder atau tersier, lebih hemat dalam operasional dan pemeliharaan, serta tidak menghasilkan lumpur biosolid atau bau yang mengganggu.

Menurut (Erwin *et al.* 2017), penurunan kandungan fosfat disebabkan oleh proses fisika, kimia dan biologi karena adanya interaksi antara tanaman, substrat dan mikroorganisme. Tanaman berperan penting karena memiliki beberapa fungsi antara lain sebagai media tumbuh mikroorganisme dan juga menyediakan kebutuhan oksigen bagi akar dan daerah perkaran dengan proses fotosintesa, yang digunakan untuk pertanaman biologis bagi mikroorganisme yang berada di zona akar. Dalam hal ini tanaman memiliki kemampuan memompa udara melalui sistem akar. Selain itu tanaman juga menjadi komponen penting dalam proses transformasi nutrient yang berlangsung secara fisik dan kimia mendukung proses pengendapan terhadap partikel tersuspensi. Dapat dikatakan bahwa sistem resirkulasi berpengaruh terhadap peningkatan efisiensi penghilangan fosfat di CW. Pengaruhnya terutama karena semakin lama HRT maka kontak air limbah dengan media substrat dan tanaman juga akan meningkat sehingga dapat meningkatkan efisiensi pengikatan fosfat oleh zona adsorpsi dan akar tanaman.

3.3 Kelebihan dan Kekurangan dari CW Sistem Reirkulasi

Berdasarkan hasil-hasil penelitian yang telah dianalisis dalam rentang waktu dekade terakhir, dapat diidentifikasi sejumlah poin yang merangkum kelebihan dan kekurangan sistem CW dengan penerapan resirkulasi aliran. Evaluasi mendalam terhadap aspek-aspek ini memiliki signifikansi yang tinggi, karena dapat menjadi landasan utama dalam proses pengambilan keputusan terkait perencanaan, desain, serta pengelolaan sistem pengolahan air limbah yang tidak hanya efektif secara teknis, tetapi juga efisien secara ekonomis dan berkelanjutan dari sisi lingkungan. Beberapa kelebihan utama dari sistem CW dengan resirkulasi antara lain adalah:

- 1) Peningkatan efisiensi penghilangan polutan
CW dengan sistem resirkulasi terbukti dapat meningkatkan efisiensi penghilangan polutan, khususnya untuk senyawa organik dan nitrogen. Resirkulasi mengembalikan sebagian air olahan dan dialirkan kembali ke tahap awal sistem, sehingga waktu kontak antara air limbah, media, tanaman, dan mikroorganisme menjadi lebih panjang (Decezaro *et al.* 2021) dalam (Santos *et al.* 2024). Hal ini memperbaiki proses biologis utama seperti nitrifikasi dan denitrifikasi, serta memperkuat degradasi bahan organik.
- 2) Peningkatan Oksigen Terlarut (DO)
Proses resirkulasi memperbaiki suplai oksigen dalam media CW, hal ini dapat berpengaruh terhadap proses nitrifikasi aerob dan memungkinkan proses denitrifikasi setelahnya. Studi yang dilakukan dalam beberapa tahun terakhir menunjukkan bahwa resirkulasi mampu meningkatkan tingkat oksigen terlarut (DO) dalam air limbah, menyediakan kondisi bagi mikroorganisme untuk meningkatkan biodegradasi dan efisiensi penghapusan bahan organik dalam sistem (Foladori *et al.* 2013; Wu *et al.* 2015; Ilyas & Mahsi, 2017; Sharma *et al.* 2018; Saeed *et al.* 2021) dalam (Santos *et al.* 2024).
- 3) Dapat mereduksi beban toksik pada air limbah
CW dengan sistem resirkulasi dapat efektif dalam mereduksi beban toksik di air limbah, karena mencampur kembali sebagian effluent yang telah diolah dengan influen awal. Mekanisme ini mendistribusikan kontaminan secara lebih merata, mengurangi konsentrasi awal sangat tinggi, dan menjaga proses biologis seperti nitrifikasi dan denitrifikasi tetap stabil. Misalnya, dalam studi (Herrera *et al.* 2023) menggunakan macrophyte pond – CW, penerapan resirkulasi hingga 50 % mampu mengencerkan toksitas lindi (*landfill leachate*) serta meningkatkan degradasi sebagian logam seperti Na, Ca, dan Fe. Namun, bukan berarti sistem ini universal dan cocok untuk semua jenis limbah toksik. Ada polutan yang sulit terdegradasi meski efisiensi hidraulik dan oksigenasi meningkat. Contohnya pada air limbah farmasi dan obat-obatan seperti ibuprofen, atenolol, gemfibrozil, dan diclofenac justru menunjukkan penurunan tingkat penghilangan saat dilakukan resirkulasi (Herrera *et al.* 2023). Menurut (Saeed *et al.* 2021) sistem resirkulasi berpotensi menghambat degradasi senyawa resisten. Walaupun resirkulasi dapat meningkatkan kontak antara mikroba dan air limbah, namun masih terdapat banyak senyawa organik yang sulit didegradasi. Hal ini seringkali mengharuskan pencampuran dengan teknologi lain seperti aerasi atau penggunaan sistem hybrid CW. Maka dapat disimpulkan bahwa sistem resirkulasi pada CW bukan teknologi universal untuk semua jenis limbah. Teknologi ini sangat cocok untuk limbah dengan beban organik dan nitrogen tinggi, seperti limbah domestik, limbah pertanian, dan industri ringan. Untuk limbah dengan kandungan bahan toksik yang tinggi, perlu dilakukan pretreatment terlebih dahulu, karena jika tidak dapat berpotensi membunuh tanaman dan mikroba di dalam media.
- 4) Mengurangi luas lahan yang diperlukan
Menurut (Jung *et al.* 2020), modifikasi CW dengan sistem aerasi dan resirkulasi dapat mengurangi kebutuhan luas lahan yang diperlukan untuk mencapai efisiensi penghilangan dari NH_3^- -N dan Total Kjeldahl Nitrogen (TKN).

Beberapa kekurangan dari CW dengan sistem resirkulasi diantaranya adalah:

- 1) Bertambahnya konsumsi energi dan infrastruktur tambahan.
Secara umum, resirkulasi limbah dapat diterapkan dengan mudah karena hanya memerlukan pengatur waktu, pipa resirkulasi, dan pompa berukuran kecil yang menunjukkan bahwa strategi ini berbiaya rendah. Pompa berukuran kecil akan menghasilkan laju aliran resirkulasi yang rendah, konsumsi energi yang rendah, serta resuspensi sedimen yang minim atau bahkan tidak terjadi di saluran keluaran (*outlet*). Perlu ditekankan bahwa resirkulasi efluen sebaiknya tidak melebihi 100% guna meminimalkan konsumsi energi. Menurut

(Baggiotto *et al.* 2025) adalah ketika aliran masuk ke CW lebih tinggi, maka diperlukan daya yang lebih besar juga dari rakitan motor - pompa dan mengakibatkan peningkatan kebutuhan energi. (Herrera *et al.* 2023) dalam penelitiannya juga mengatakan bahwa dalam sistem berskala besar, lebih baik meminimalkan resirkulasi, karena pemompaan air dalam volume besar menimbulkan biaya tambahan untuk energi dan peralatan.

2) Kompleksitas operasional dan kontrol

CW dengan sistem resirkulasi memiliki kompleksitas operasional dan kontrol yang lebih tinggi dibanding sistem aliran tunggal (linier). Salah satu tantangan utama adalah pengaturan rasio resirkulasi yang harus disesuaikan secara dinamis berdasarkan beban limbah dan efisiensi pengolahan. Rasio yang terlalu tinggi dapat menyebabkan peningkatan konsumsi energi, resiko *clogging* media, dan perubahan kondisi redoks yang tidak stabil. Kompleksitas lainnya meliputi kebutuhan pemantauan parameter penting seperti debit aliran, waktu tinggal hidraulik (HRT), kadar oksigen terlarut (DO), pH, suhu, dan potensi redoks (ORP), yang dapat berpengaruh terhadap proses nitrifikasi dan denitrifikasi. Sistem ini juga memerlukan pompa yang harus dirawat secara berkala. Tanpa kontrol operasional yang baik, efektivitas sistem dapat menurun atau bahkan gagal.

3) Berpotensi menimbulkan resiko *Bioclogging* dan *Clogging* pada media

Clogging adalah kondisi tersumbatnya media filtrasi (kerikil, pasir, tanah) pada CW akibat akumulasi padatan, lumpur, akar tanaman, atau pertumbuhan mikroba, yang menyebabkan penurunan laju aliran air dan kegagalan fungsi sistem. Resirkulasi mengalirkan air olahan yang tetap mengandung *Total Suspended Solid* (TSS) dan partikel halus kembali ke inlet, sehingga terjadi akumulasi padatan dalam media lebih cepat dibanding aliran satu arah. Studi pada sistem *pond* – CW menunjukkan bahwa *bed clogging* adalah kendala utama di SSF CW, akibat beban TSS yang berulang (Herrera *et al.* 2023). Aliran yang terus-menerus merangsang pertumbuhan mikroba dan biofilm, yang dapat menyumbat pori media.

4) KESIMPULAN

Hasil kajian literatur dalam rentang waktu 10 tahun terakhir menunjukkan bahwa *Constructed Wetland* dengan sistem resirkulasi memiliki potensi besar dalam meningkatkan efisiensi pengolahan air limbah dibandingkan sistem CW konvensional. Penerapan sistem resirkulasi terbukti mampu meningkatkan efisiensi penghilangan parameter pencemar khususnya dalam penghilangan beban organik (COD, BOD), nutrien (nitrogen dan fosfor), melalui peningkatan waktu kontak antara air limbah dengan media filtrasi, mikroorganisme, dan tanaman air. Resirkulasi juga membantu menjaga kestabilan proses pengolahan, terutama dalam menghadapi fluktuasi beban pencemar dan variasi debit limbah, serta mampu mengatasi keterbatasan waktu tinggal hidraulik (HRT) yang sering menjadi kendala utama dalam CW konvensional. Namun demikian, penerapan sistem resirkulasi tidak lepas dari tantangan, terutama terkait aspek teknis dan ekonomi. Sistem ini memerlukan tambahan peralatan seperti pompa untuk mengalirkan kembali air olahan ke inlet, dan penggunaan rasio resirkulasi yang tinggi dapat menyebabkan peningkatan konsumsi energi. Kondisi ini dapat menyebabkan peningkatan biaya operasional dan mengurangi keuntungan ekonomis dari CW, yang selama ini dikenal sebagai teknologi sederhana dan berbiaya rendah. Oleh karena itu, penggunaan energi dan rasio resirkulasi perlu dirancang seefisien mungkin, agar peningkatan efisiensi pengolahan tidak justru menimbulkan beban biaya energi yang tinggi. Secara keseluruhan, CW dengan sistem resirkulasi tetap merupakan teknologi pengolahan limbah yang adaptif dan berkelanjutan, sangat cocok diterapkan pada limbah domestik, limbah pertanian, dan limbah industri skala kecil hingga menengah, khususnya di wilayah dengan ketersediaan lahan yang memadai dan kebutuhan akan solusi ramah lingkungan. Untuk menjamin efektivitas dan keberlanjutan sistem ini, perencanaan desain, pemilihan tanaman, kontrol rasio resirkulasi, serta pendekatan manajemen operasional yang efisien menjadi faktor kunci yang perlu diperhatikan.

DAFTAR PUSTAKA

- Adlini, M.N., Dinda, A.H., Yulinda, S., Chotimah, O., dan Merliyana, S.J., 2022. Metode Penelitian Kualitatif Studi Pustaka. *Edumas pul: Jurnal Pendidikan*, 6 (1), 974–980.
- Akratos, C.S. dan Tsirhrintzis, V.A., 2007. Effect of temperature, HRT, vegetation and porous media on removal efficiency of pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 29 (2), 173–191.
- Ayaz, S.C., Aktas, O., Akça, L., dan Findik, N., 2015. Efficient quality and reuse potential of domestic wastewater

- treated in a pilot-scale hybrid constructed wetland system. *Journal of Environmental Management*, 156, 115–120.
- Baggiotto, C., Terezinha, S., Alexandre, C., Beatriz, D., Friedrich, M., Jose, R., dan Gonz, M., 2025. Nitrogen removal in vertical flow constructed wetlands : The influence of recirculation and partial saturation. *Ecological Engineering*, 212 (2024).
- Erwin, E., Joko, T., dan D, H.L., 2017. Efektifitas Constructed Wetlands Tipe Subsurface Flow System Dengan Menggunakan Tanaman Cyperus Rotundus Untuk Menurunkan Kadar Fosfat dan COD Pada Limbah Cair Laundry. *Jurnal Kesehatan Masyarakat (e-Journal)*, 5 (1), 444–449.
- Haddaji, D., Ghrabi-Gammar, Z., Hamed, K. Ben, dan Bousselmi, L., 2019. A re-circulating horizontal flow constructed wetland for the treatment of synthetic azo dye at high concentrations. *Environmental Science and Pollution Research*, 26 (13), 13489–13501.
- Herrera-Melián, J.A., Guedes-Alonso, R., Tite-Lescano, J.C., Sosa-Ferrera, Z., dan Santana-Rodríguez, J.J., 2023. Enhancing pharmaceutical removal in a full-scale constructed wetland with effluent recirculation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11 (6).
- Herrera-Melián, J.A., Guedes-Alonso, R., Tite-Lezcano, J.C., Santiago, D.E., Ranieri, E., dan Alonso-Bilbao, I., 2023. The Effect of Effluent Recirculation in a Full-Scale Constructed Wetland System. *Sustainability (Switzerland)*, 15 (5).
- Heryana, A., 2021. Jenis-jenis Studi Literature Review. *ResearchGate*, (March), 1–4.
- Idrus, S. dan Dewa, R.P., 2017. Identifikasi Cemaran Air Limbah Industri Tahu.
- Jung, C., Ming, J., Xue, W., Aboga, F., Marie, R., Mendoza, O., Senoro, D.B., Feng, R., Hsiang, C., dan Ji, D., 2020. Application of an innovative front aeration and internal recirculation strategy to improve the removal of pollutants in subsurface flow constructed wetlands. *Journal of Environmental Management*, 256.
- Langergraber, G., 2013. Are constructed treatment wetlands sustainable sanitation solutions? *Water Science and Technology*, 67 (10), 2133–2140.
- Oktaviyani, D., Pratiwi, N.T.M., Krisanti, M., Chrismada, T., dan Susanti, E., 2024. The Potential of Floating Treatment Wetlands for Pollutant Removal in the Recirculating Aquaculture System of Catfish. *Journal of Ecological Engineering*, 25 (4), 111–118.
- Qomariyah, S., Sobriyah, S., Koosdaryani, K., dan Muttaqien, A.Y., 2017. Lahan Basah Buatan Sebagai Pengolah Limbah Cair Dan Penyedia Air Non-Konsumsi. *Jurnal Riset Rekayasa Sipil*, 1 (1), 25.
- Rakhmatika, S., Joko, T., dan Nurjazuli, N., 2017. Perbedaan Efektivitas Constructed Wetlands Recirculating Free Water Surface dan Subsurface Flow System Echinodorus palaefolius untuk Menurunkan Fosfat Limbah Cair Rumah Tangga (Greywater) Studi Kasus: Kelurahan Gedawang, Kecamatan Banyumanik. *Jurnal Kesehatan Masyarakat (Undip)*, 5 (1), 482–488.
- Saeed, T., Miah, M.J., Majed, N., Alam, M.K., dan Khan, T., 2021. Effect of effluent recirculation on nutrients and organics removal performance of hybrid constructed wetlands: Landfill leachate treatment. *Journal of Cleaner Production*, 282, 125427.
- Santos, M.S., Silva Júnior, É.D. da, Silva, B.D., dan Ferreira, I.L.S., 2024. Evaluation of a constructed wetlands hybrid system with and without recirculation. *Acta Scientiarum. Technology*, 46 (1), e66304.
- Sasiang, E., Maddusa, S.S., Kesehatan, F., Universitas, M., Ratulangi, S., Solid, T., dan Oxygen, D., 2019. Efektivitas Instalasi Pengolahan Air Limbah Berdasarkan Parameter Biological Oxygen Demand, Chemical Oxygen Demand Dan Derajat Keasaman Di Rumah Sakit Umumgmin Pancaran Kasih Manado, 8 (6), 608–615.
- Vymazal, J., 2007. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Science of the Total Environment*, 380 (1–3), 48–65.
- Wang, Y., Hu, M., Chen, J., Cui, H., Zhu, S., Jin, T., Qu, K., dan Cui, Z., 2024. Journal of Water Process Engineering Purification of seawater aquaculture using constructed wetlands in a recirculating aquaculture system for Pacific white shrimp (Litopenaeus vannamei) and analysis of microbial community structure. *Journal of Water Process Engineering*, 66 (August), 105959.
- Yaasmin, L.S., 2024. Mengoptimalkan Manajemen Kurikulum untuk Pendidikan Inklusif di Sekolah Dasar. *Jurnal Papeda*, 6 (3), 370–380.
- Yang, C., Fu, T., Wang, H., Chen, R., dan Wang, B., 2021. Environmental Technology & Innovation Removal of organic pollutants by effluent recirculation constructed wetlands system treating landfill leachate. *Environmental Technology & Innovation*, 24, 101843.