



## Pengaruh *Typha angustifolia*, *Echinodorus paniculatus*, dan *Ludwigia adscendens* terhadap Kinerja Horizontal Sub-surface Flow Constructed Wetland dalam Penghapusan Total coliform dan TSS

## The Effect of *Typha angustifolia*, *Echinodorus paniculatus*, and *Ludwigia adscendens* on The Performance of Horizontal Sub-surface Flow Constructed Wetland in Total coliforms and TSS Removal

ABDUL GANI AKHMAD<sup>1\*</sup>, SAIFUL DARMAN<sup>2</sup>, AIYEN<sup>2</sup>, WILDANI PINGKAN S. HAMSSENS<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Fakultas Teknik, Universitas Tadulako, Palu.

<sup>2</sup>Program Studi Doktoral Ilmu Pertanian, Pascasarjana, Universitas, Palu

\*gani9367@yahoo.co.id

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 6 October 2021

Accepted 13 July 2022

Published 31 July 2022

#### Keywords:

Constructed wetland

*E. paniculatus*

Hospital wastewater

*L. adscendens*

*T. angustifolia*

### ABSTRACT

The performance of the Wastewater Treatment Plants (WWTP) in several hospitals is reported low, where the wastewater often does not meet the quality standards so that it has the opportunity to pollute the environment. Horizontal Sub-surface Flow Constructed Wetland (HSSF-CW) is a green and sustainable technology; it can be used as an alternative technology for hospital wastewater treatment. This study aimed to evaluate the performance of HSSF-CW on a pilot-scale in the removal of total coliform (TC) and total suspended solids (TSS), as well as to assess the effect of *Ludwigia adscendens*, *Echinodorus paniculatus*, and *Typha angustifolia* plants on the performance of HSSF-CW using experimental methods. The operational and design strategy adopted was setting the water depth at 0.30 m, maximum hydraulic loading rate of 3.375 m<sup>3</sup>/day, continuous wastewater recirculation, the use of river sand-gravel media measuring 5–8 mm, as well as setting tight spacing for *T. Angustifolia* was 53 clumps per m<sup>2</sup>, *L. adscendens* 133 stems per m<sup>2</sup>, and *E. paniculatus* 13 clumps per m<sup>2</sup>. The results of this study indicate that the performance of the HSSF-CW system on a pilot-scale planted with *L. adscendens*, *E. paniculatus*, or *T. Angustifolia* has proven to be able to eliminate the TC and TSS parameters of hospital wastewater to match their respective quality standards in hydraulic retention times <2 and 4 days. It can be concluded that *T. Angustifolia*, *E. paniculatus*, and *L. adscendens* positively boost the performance of HSSF-CW in the removal of TC and TSS. However, *T. Angustifolia* had a better effect than *E. paniculatus* and *L. adscendens* on the performance of the HSSF-CW system.

### INFORMASI ARTIKEL

#### Histori artikel:

Diterima 6 Oktober 2021

Disetujui 13 Juli 2022

Diterbitkan 31 Juli 2022

#### Kata kunci:

Air limbah rumah sakit

*E. paniculatus*

Lahan basah buatan

*L. adscendens*

*T. angustifolia*

### ABSTRAK

Kinerja Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) beberapa rumah sakit dilaporkan rendah, dimana air buangnya seringkali tidak memenuhi baku mutu sehingga berpeluang mencemari lingkungan. Horizontal Sub-surface Flow Constructed Wetland (HSSF-CW) adalah teknologi hijau dan berkelanjutan, yang dapat digunakan sebagai teknologi alternatif untuk pengolahan air limbah rumah sakit. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja HSSF-CW skala percontohan dalam penghilangan total coliform (TC) dan total padatan tersuspensi (TSS), serta menilai pengaruh tumbuhan *Ludwigia adscendens*, *Echinodorus paniculatus*, dan *Typha angustifolia* terhadap kinerja HSSF-CW dengan metode eksperimental. Desain dan strategi operasional yang ditempuh adalah pengaturan kedalaman air pada 0,30 m, laju pemuatan hidrolik maksimal 3,375 m<sup>3</sup>/hari, resirkulasi air limbah secara kontinyu, pemakaian media pasir-kerikil sungai ukuran 5–8 mm, serta pengaturan jarak tanam yang rapat masing-masing untuk *T. angustifolia* adalah 53 rumpun per m<sup>2</sup>, *L. adscendens* 133 batang per m<sup>2</sup>, dan *E. paniculatus* 13 rumpun per m<sup>2</sup>. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kinerja sistem HSSF-CW skala percontohan yang ditanami *L. adscendens*, *E. paniculatus*, ataupun *T. angustifolia* terbukti mampu menyisihkan parameter TC dan TSS air limbah rumah sakit hingga sesuai baku mutu dalam waktu retensi hidrolik <2 dan 4 hari. Dapat disimpulkan bahwa *T. angustifolia*, *E. paniculatus*, dan *L. adscendens* secara positif mendorong kinerja HSSF-CW dalam penghilangan TC dan TSS. Namun, *T. angustifolia* memiliki pengaruh lebih baik dibandingkan *E. paniculatus* dan *L. adscendens* terhadap kinerja sistem HSSF-CW.

## 1. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Kinerja Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) beberapa rumah sakit di Kota Palu dilaporkan rendah, sehingga air buangnya sering tidak memenuhi baku mutu, terutama parameter *total coliform* (TC) dan *total suspended solid* (TSS). Rumah sakit umumnya menggunakan IPAL biofilter aerobik-anaerobik klorinasi yang pengoperasian dan perawatannya kompleks dan mahal (Akhmad et al., 2020). Dalam Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 7 Tahun 2019 telah diatur tentang kewajiban setiap rumah sakit memiliki IPAL dengan izin, dan buangnya harus memenuhi baku mutu.

Pemerintah telah mencanangkan semua rumah sakit di Indonesia untuk menerapkan konsep *green hospital* pada tahun 2020, sehingga *trend* ke depan dibutuhkan model rumah sakit dengan aktivitas yang berbasis ramah lingkungan, termasuk untuk pengelolaan air limbahnya. *Horizontal Sub-surface Flow Constructed Wetland* (HSSF-CW) adalah teknologi hijau dan berkelanjutan yang berbasis tumbuhan air. Teknologi tersebut layak diadopsi sebagai alternatif sistem pengolahan air limbah rumah sakit karena beberapa faktor yang mendukungnya seperti iklim yang tropis dan beragam tumbuhan air tumbuh subur sepanjang tahun (Akhmad et al., 2020). Agar teknologi tersebut mudah diterima masyarakat, HSSF-CW bisa ditampilkan sebagai taman yang memberi manfaat estetika (Ye & Li, 2009; Calheiros et al., 2015; Marín-Muñiz et al., 2018; Chandanshive et al., 2018; Sandoval-Herazo et al., 2018).

*Horizontal Sub Surface Flow Constructed Wetland* (HSSF-CW) biasanya menghasilkan limbah bahan organik dan padatan tersuspensi yang rendah. Namun, untuk menghilangkan *Escherichia coli*, sistem ini cocok dikombinasikan dengan teknologi lain, seperti desinfeksi klorin atau ultra-violet (UV) (Headley et al., 2013). Namun, praktik disinfeksi dengan bahan kimia seperti klorin dapat menimbulkan masalah kesehatan dan ekologi lainnya karena pembentukan trihalometana (Toscano et al., 2013). Juga disinfeksi UV tidak selalu cocok untuk disinfeksi limbah dari HSSF-CW karena pengembangan lapisan seperti biofilm pada bola lampu dapat menghalangi sinar UV (Richter & Weaver, 2003). Sebuah sistem HSSF-CW modifikasi telah dikembangkan menggunakan media kerikil 8–16 mm dengan kedalaman 1,00 m ditambah dengan aerasi buatan terbukti mampu menurunkan kadar defisiensi konsentrasi *E. coli* secara konsisten. Hanya saja pada tingkat pembebanan yang relatif tinggi, diperlukan input listrik yang ekstensif untuk menggerakkan pompa udara (Headley et al., 2013). Peningkatan penghilangan *Fecal Coliform* dalam filter aerasi mungkin disebabkan oleh kondisi aerobik yang memungkinkan protozoa yang hidup bebas dan predator lain menjadi aktif bahkan di musim dingin. Namun, mekanisme penghilangan lain, seperti kompetisi, sedimentasi, filtrasi, dan proteolisis, juga dapat terjadi (Mara & Johnson, 2006).

Pada penelitian ini, strategi operasional yang dicoba dilakukan untuk mengoptimalkan kondisi aerobik pada HSSF-CW skala percontohan adalah (1) memaksimalkan peran akar tumbuhan dengan pengaturan jarak tanam yang

rapat; (2) kedalaman air dibatasi pada 0,30 m yang disesuaikan dengan kedalaman yang umumnya bisa ditembus oleh pertumbuhan akar. Kedalaman air yang direkomendasikan sekitar 30 cm, dimana *constructed wetland* (CW) yang dangkal dipercaya memiliki aerasi limbah yang lebih baik dari CW yang dalam (Moshiri, 2020); (3) perlakuan resirkulasi air limbah secara kontinyu untuk memungkinkan aerasi pasif ekstensif. Peningkatan oksigen terlarut memiliki hubungan dengan kematian patogen di lingkungan akuatik (Fernández et al., 1992; Pearson et al., 1987); (4) Media pasir-kerikil sungai dipilih yang berukuran lebih halus (5–8 mm) dengan pertimbangan untuk memberikan kondisi kondusif terhadap pertumbuhan akar tanaman, juga penggunaan media granular ukuran kecil dapat meningkatkan rasio inaktivasi mikroba antara 1,0 dan 2,0 log unit untuk penghapusan *fecal coliform* daripada media ukuran besar (Ottova et al., 1997; García et al., 2003).

Sebagai representasi pada fungsi HSSF-CW sebagai taman, maka dipilih tiga jenis tumbuhan air hias yakni *Ludwigia adscendens* (Tapak dara air), *Echinodorus paniculatus* (Melati air berdaun lancip), dan *Typha angustifolia* (Lembang). *L. adscendens* banyak tumbuh di tepi aliran Sungai Palu. *T. angustifolia* banyak tumbuh di lahan-lahan basah di wilayah Kota Palu. Sedangkan *E. paniculatus* dibudidayakan masyarakat sebagai tanaman hias kolam. Ketiga spesies tumbuhan air tersebut dipilih dengan pertimbangan memiliki bentuk estetik, pertumbuhannya cepat, dan memiliki potensi menyerap polutan. Telah dilaporkan kemampuan *T. angustifolia* dalam menyerap limbah farmasi yang mengandung *ibuprofen* ( $\sim 107,2 \text{ mgL}^{-1}$ ) melalui fitoekstraksi, dimana *ibuprofen* ditemukan 160,7 ng g<sup>-1</sup> terakumulasi dalam pelepah daun dan jaringan lamina (Li et al., 2016). Kinerja *Constructed wetland* yang ditanami *T. angustifolia* dengan tambahan aerasi atmosfer menggunakan jaringan pipa berlubang dalam pengolahan influen dari Danau Marriott di Mesir secara keseluruhan menunjukkan efisiensi penyisihan polutan yang tinggi, penghilangan kekeruhan sebesar 98,4%; kebutuhan oksigen biokimia (BOD<sub>5</sub>) 83,3%; kebutuhan oksigen kimia (COD) 95,8%; NH<sub>3</sub>-N 99,9%; nitrogen total (TN) 94,7%; NO<sup>3</sup>-N dan NO<sup>2</sup>-N meningkat; penyisihan P total (TP) 99,7%, *Vibrio sp.* 100%, *Escherichia coli* 100%; jumlah bakteri total 92,3%; dan pengurangan bakteri anaerob 97,5% (Gaballah et al., 2020). Adapun *L. adscendens* yang diaplikasikan untuk restorasi limbah kotoran babi di daerah subtropis menunjukkan status pertumbuhan yang sangat baik, dan tingkat pertumbuhan biomassa bersihnya 539,8%, dapat mengatur pH air limbah, meningkatkan potensi oksigen terlarut dan reduksi oksidasi, serta menurunkan nilai konduktivitas listrik. Laju penyisihan NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, NO<sup>3</sup>-N, NO<sup>2</sup>-N, TN, TP, COD, dan Chl-a masing-masing mencapai 98,67%, 64,83%, 26,35%, 79,30%, 95,90%, 69,62%, dan 92,23%. Tingkat kontribusi penyerapan TN dan TP masing-masing 40,6% dan 43,5% (Xu et al., 2020). Referensi terkait kemampuan *E. paniculatus* tidak ditemukan. Namun terdapat *Echinodorus palifolius*, berasal dari genus yang sama dengan *E. paniculatus*, dilaporkan memiliki tingkat penyerapan terhadap logam berat Pb, Cr, Cd, Zn, Cu dan Fe dengan penyerapan tertinggi pada Fe sebesar 2,63 mg/kg per hari (Hasbi et al., 2020).

**1.2 Tujuan Penelitian**

Tujuan utama penelitian ini adalah mengevaluasi kinerja sistem HSSF-CW skala percontohan dalam penghilangan *total coliform* dan TSS air limbah rumah sakit, serta menguji pengaruh tumbuhan *L. ascendens*, *E. paniculatus*, dan *T. angustifolia* terhadap kinerja HSSF-CW. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi bahan pertimbangan pada upaya intensifikasi sistem HSSF-CW ke depan, serta pengayaan ragam tumbuhan air hias yang representatif untuk HSSF-CW.

**2. METODE**

**2.1 Desain dan Pengaturan Eksperimental**

Tersedia tiga unit HSSF-CW skala percontohan berbahan fiber glass dengan dimensi panjang (L) 1,00 m, lebar (W) 0,45 m, dan tinggi (h) 0,35 m. Kemiringan dasar reaktor (S) dibuat 0,5%. Sel HSSF-CW diisi dengan media pasir-kerikil berukuran 5–8 mm setinggi 0,35 m. Kedalaman media yang terendam (d) adalah 0,30 m. Juga diberikan beban laju pemuatan hidrolis (Q) maksimum 3,375 m<sup>3</sup>/hari. Nilai Q maksimum tersebut diperoleh dari hasil perhitungan menggunakan Persamaan 1.

$$Q = A_c \cdot K_s \cdot S \dots \dots \dots (1)$$

Dengan Q: laju pemuatan hidrolis (m<sup>3</sup>/hari); A<sub>c</sub>: luas penampang reaktor (m<sup>2</sup>); K<sub>s</sub>: konduktivitas hidrolis 5000 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/hari (USEPA, 2000), dan; S: kemiringan dasar reaktor (%).

Untuk memudahkan pengamatan saat eksperimen, maka perhitungan luas permukaan ideal HSSF-CW ditetapkan berdasarkan waktu retensi hidrolis 1 hari. Dengan menggunakan Persamaan 2 diperoleh luas ideal

HSSF-CW (A<sub>s</sub>) sama dengan 32 m<sup>2</sup> untuk waktu retensi hidrolis 1 hari.

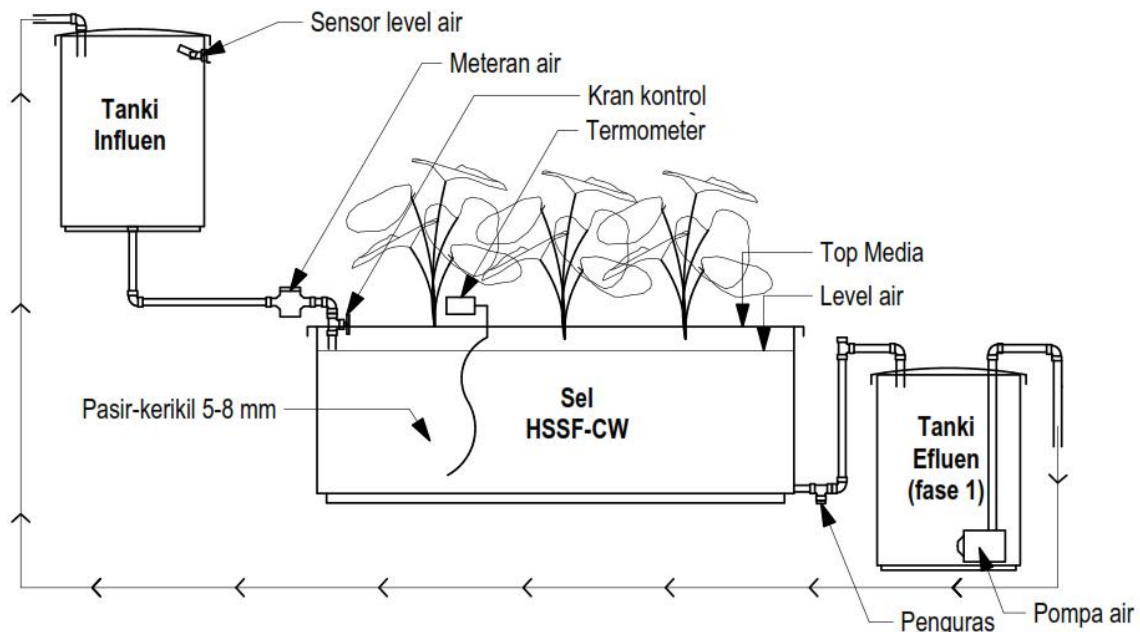
$$A_s = \frac{Q \cdot t}{d \cdot n} \dots \dots \dots (2)$$

Dengan A<sub>s</sub>: luas permukaan reaktor (m<sup>2</sup>); t: waktu retensi hidrolis (hari); d: kedalaman media yang terendam (m), dan; n: porositas media 0,35 (USEPA, 2000).

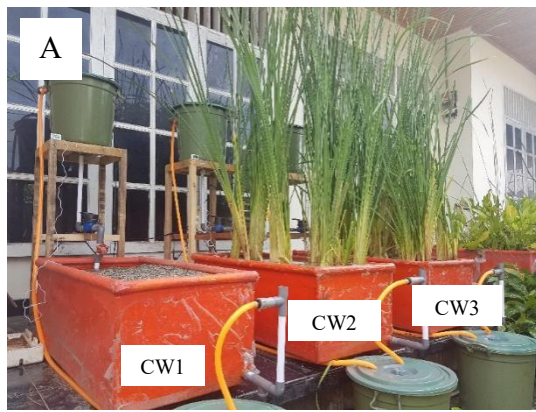
Oleh karena luas permukaan sel HSSF-CW skala percontohan hanya 0,45 m<sup>2</sup> dan pada prinsipnya air limbah di dalam sel tidak boleh diam, maka efluen perlu diresirkulasi secara kontinyu. Proses resirkulasi secara kontinyu yang berlangsung selama 24 jam setara dengan waktu retensi hidrolis 1 hari, sehingga equivalen luas ideal 32 m<sup>2</sup> bisa terpenuhi.

**2.2 Deskripsi Pengaturan Eksperimental dan Konstruksi**

Pengaturan eksperimen seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Karena keterbatasan perlengkapan eksperimental, maka kegiatan eksperimen dilakukan dua kali dalam waktu yang berbeda sehingga kualitas air limbah asal yang digunakan tidak sama. Pengulangan dilakukan dua kali untuk semua perlakuan, kecuali untuk HSSF-CW yang ditanami *L. ascendens* karena terbatasnya perlengkapan eksperimen. Pada setiap eksperimen terdiri atas tiga unit HSSF-CW seperti tampak pada Gambar 2. Pada eksperimen pertama, unit HSSF-CW pertama (CW1) tanpa vegetasi sebagai kontrol, HSSF-CW kedua dan ketiga (CW2 dan CW3) masing-masing ditanami *T. angustifolia* sebanyak 24 rumpun (kerapatan tanam 53 rumpun per m<sup>2</sup>). Pada eksperimen kedua, HSSF-CW pertama (CW4) ditanami *L. ascendens* sebanyak 60 batang (kerapatan tanam 133 batang per m<sup>2</sup>), HSSF-CW kedua dan ketiga (CW5 dan CW6) masing-masing ditanami *E. paniculatus* sebanyak 6 rumpun (kerapatan tanam 13 rumpun per m<sup>2</sup>).



Gambar 1. Skema pengaturan unit HSSF-CW skala percontohan



A. Eksperimen Pertama



B. Eksperimen Kedua

Gambar 2. Foto kegiatan eksperimen

Setiap unit HSSF-CW terdiri atas tiga komponen: tangki influen, sel HSSF-CW, dan tangki efluen. Tangki influen dilengkapi sensor level air, *flow meter*, katup kontrol debit, dan pipa distribusi menuju sel. Influen dialirkan secara gravitasi melalui pipa distribusi ke *inlet* sel HSSF-CW dengan debit diatur maksimum 3,375 m<sup>3</sup>/hari. Sel HSSF-CW sebagai tempat berlangsungnya proses pengolahan dilengkapi pengukur suhu air. Ujung pipa *inlet* pada sel diletakkan pada ketinggian 0,35 m dari dasar sel, sedangkan pipa outlet diletakkan pada dasar sel dengan ujung pembuangan yang ditinggikan 0,30 m untuk menjaga konsistensi ketinggian permukaan air pada sel. Di dalam sel, influen mengalir perlahan melalui media pasir-kerikil dan zona perakaran dalam jalur yang kurang lebih horizontal hingga mencapai *outlet*. Tangki efluen untuk menampung air hasil pengolahan, dilengkapi pompa air yang berfungsi meresirkulasi efluen kembali ke tangki influen secara kontinyu. Pompa air tersebut dilengkapi dengan *switch on-off* yang disambungkan ke sensor level air di tangki influen agar air tidak meluap.

**2.3 Prosedur Pengoperasian**

Pengoperasian unit HSSF-CW dilakukan dengan prosedur sebagai berikut. (i) Material pasir-kerikil diayak untuk mendapatkan media pasir-kerikil dengan butiran 5–8 mm, dicuci bersih, kemudian diisikan ke sel setinggi 0,35 m. (ii) Komponen HSSF-CW dipasang dan diatur. Katup kontrol debit diatur dengan volume air keluar maksimum 3,375 m<sup>3</sup>/hari. (iii) Dilakukan pengujian unit HSSF-CW untuk memastikan semua komponen sistem berfungsi dengan baik. Pada pengetesan ini masih menggunakan air kran. (iv) Tumbuhan air yang dikumpulkan sebelumnya dipindahkan dan ditanam secara monokultur pada sel HSSF-CW. (v) Proses aklimatisasi dilakukan selama 2 minggu, (vi) Eksperimen utama dimulai, air pada unit HSSF-CW dikuras habis untuk kemudian diisikan dengan sampel air limbah rumah sakit.

**2.4 Pengambilan dan Analisis Sampel**

Pengambilan sampel efluen di setiap unit HSSF-CW dilakukan setiap hari pada jam 09.00 pagi selama 1 minggu.

Untuk uji parameter TSS, sampel diambil dan disimpan pada botol plastik 1000 ml. Uji parameter TSS dilakukan di Laboratorium Kimia Analitik dan Lingkungan Universitas Tadulako Palu menggunakan metode gravimetri. Sampel yang homogen disaring dengan kertas saring (*Whatman 41*) yang telah ditimbang. Residu yang tertahan dalam saringan dikeringkan pada oven (*Eyela NDO-400*) sampai beratnya konstan pada suhu 103 °C sampai 105 °C. Kenaikan berat filter merupakan total padatan tersuspensi (TSS).

Pengambilan sampel efluen untuk uji parameter *total coliform* disimpan pada botol kaca steril 500 mL. Uji parameter *total coliform* dilakukan di Laboratorium Pendidikan Biologi PMIPA Universitas Tadulako Palu dengan menggunakan metode MPN (*Most Probable Number*). Kelompok *coliform* menggunakan uji kualitas mikrobiologis air sebagai indikator. Kelompok bakteri ini memiliki ciri-ciri: aerob, fakultatif anaerob, batang gram negatif, dan tidak membentuk spora fermentasi laktosa untuk membentuk asam dan gas dalam waktu 48 jam pada 35 °C.

Adapun parameter DO, suhu dan pH sampel diukur di lapangan menggunakan alat ukur kualitas air digital (*Combo Water Quality Meter AZ 86031*).

**2.5 Perhitungan Efisiensi unit HSSF-CW**

Efisiensi sistem HSSF-CW dihitung menggunakan Persamaan 3:

$$E = \frac{(C_{in} - C_{out})}{C_{in}} \times 100\% \dots \dots \dots (3)$$

dengan *E* : efisiensi penyisihan polutan (%); *C<sub>in</sub>* : beban awal polutan, dan ; *C<sub>out</sub>*: konsentrasi polutan setelah pengolahan.

**3. HASIL DAN PEMBAHASAN**

**3.1 Kualitas Air Limbah**

Kegiatan eksperimen ini menggunakan sampel air limbah dari inlet IPAL salah satu rumah sakit di Kota Palu dengan kualitas seperti disajikan pada Tabel 1. Air limbah tersebut merupakan air limbah campuran yang bersumber dari kegiatan di rumah sakit, seperti: air limbah kamar mandi, *laundry*, dapur, air limbah klinis, dan air limbah laboratorium.

Tabel 1. Kualitas air limbah asal rumah sakit

Parameter	Satuan	Konsentrasi Parameter*		Baku Mutu**
		Eksperimen I	Eksperimen II	
Suhu	°C	30,80	28,40	38
pH		7,70	8,06	6-9
DO	mg/L	3,77	1,10	
BOD	mg/L	22,70	33,43	30
COD	mg/L	65,25	72,00	100
Amonia	mg/L	1,00	1,00	10
TSS	mg/L	53,00	10,90	30
Total coliform	MPN/100 ml	91.000	>110.000	3.000

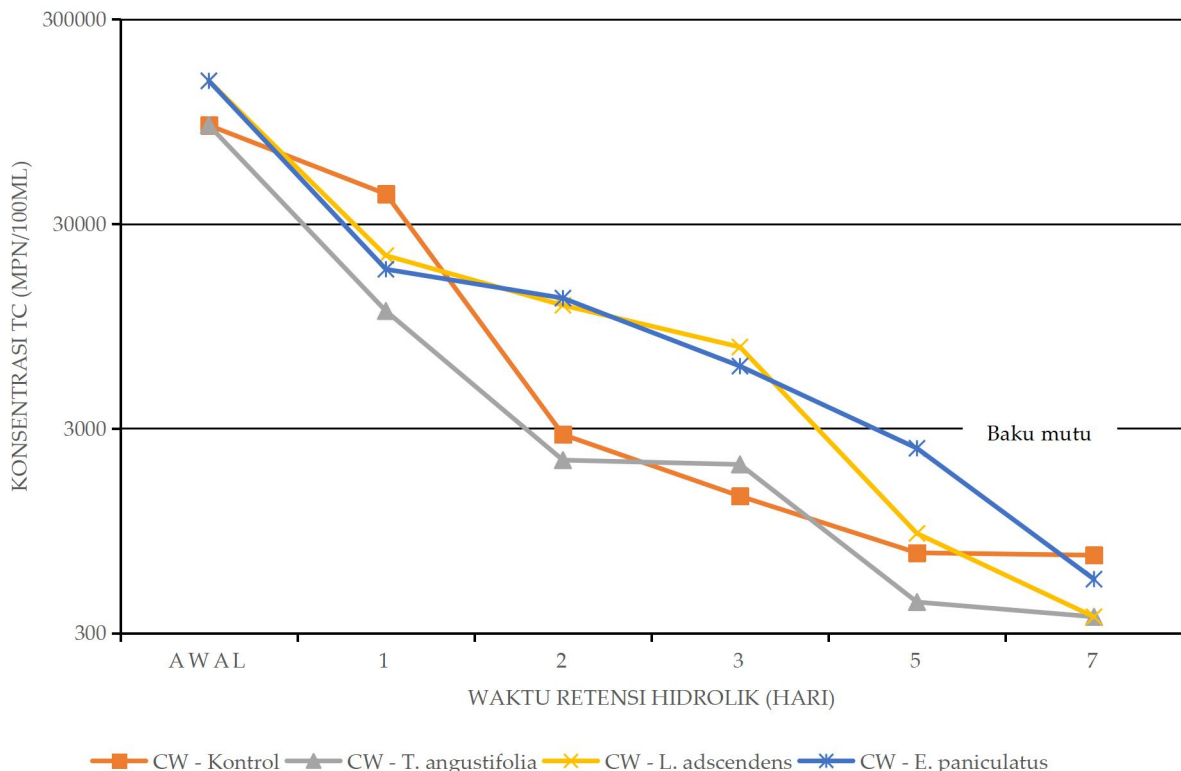
Sumber: \*Hasil Pengukuran di Lapangan dan Uji Lab; \*\*Peraturan Menteri LHK No 68 tahun 2016.

Berdasarkan Tabel 1, konsentrasi total coliform dari air limbah asal tampak tinggi yakni 91.000 dan >110.000 MPN/100 ml. Karakteristik parameter total coliform air limbah rumah sakit pada umumnya  $10^4-10^7$  MPN/100 ml (Carraro et al., 2016). Parameter BOD juga tampak tinggi untuk eksperimen kedua yakni 33,43 mg/L. Parameter TSS yang sebelumnya diduga konsentrasinya tinggi, namun didapatkan rendah untuk eksperimen kedua yakni 10,90 mg/L.

### 3.1 Penyisihan Total coliform (TC)

Constructed Wetland (CW) 1 tanpa vegetasi (kontrol) serta CW2 dan CW3 yang ditanami *T. angustifolia* menerima beban awal TC sebesar 91000 MPN/100 ml. Sementara CW4 yang ditanami *L. adscendens* serta CW5 dan CW6 yang ditanami *E. paniculatus* menerima beban awal TC sebesar >110.000 MPN/100 ml. Selama proses eksperimen dihasilkan efluen dengan konsentrasi TC seperti pada Gambar 3.

Pada Gambar 3 tampak konsentrasi TC menurun dengan bertambahnya waktu retensi hidrolis. Umumnya HSSF-CW memiliki kapasitas reduksi yang lebih baik dan efisien terhadap penyisihan parameter TC karena waktu retensi yang lebih lama (Wu et al., 2016). Waktu retensi hidrolis yang lebih lama meningkatkan paparan patogen terhadap proses penghilangan, seperti sedimentasi, adsorpsi ke bahan organik, predasi, dampak racun dari mikroorganisme atau tanaman, dan radiasi UV (Diaz et al., 2010). Juga kemungkinan disebabkan oleh pengaruh vegetasi pada sistem hidrolis, seperti peningkatan ketersediaan luas permukaan pada akar tanaman (Kansiime & van Bruggen 2001), atau eksudat akar yang dilepaskan oleh spesies tanaman yang mengandung aktivitas bakterisidal (Tuncsiper et al., 2012). Pelepasan eksudat antimikroba mungkin tidak hanya menjadi racun bagi mikroorganisme patogen, tetapi juga mengubah lingkungan fisik dan kimia dari rhizosfer dan menyebabkannya tidak sesuai untuk kelangsungan hidup patogen (Avelar et al., 2014). Juga terbukti bahwa sejumlah fecal coliform dapat dihilangkan dengan menempel pada permukaan akar tanaman (Solano et al., 2004).



Gambar 3. Grafik penyisihan total coliform menurut perlakuan dan waktu retensi hidrolis

Tabel 2. Kinerja HSSF-CW dalam penyisihan *total coliform* menurut perlakuan dan waktu retensi hidrolis

Perlakuan	Beban Awal (MPN/100 ml)	Efisiensi HSSF-CW (%) menurut Waktu Retensi Hidrolis (hari)				
		1	2	3	5	7
CW1-Kontrol	91.000	53,8	96,9	98,5	99,2	99,2
CW2- <i>T. angustifolia</i>	91.000	83,5	97,7	97,8	99,9	99,6
CW3- <i>T. angustifolia</i>	91.000	91,8	97,7	97,8	99,2	99,6
CW4- <i>L. adscendens</i>	>110.000	80,9	89,1	93,2	99,2	99,7
CW5- <i>E. paniculatus</i>	>110.000	86,4	86,4	93,2	98,2	99,3
CW6- <i>E. paniculatus</i>	>110.000	80,9	90,0	95,8	97,5	99,7

Oleh karena perlakuan HSSF-CW yang tanpa vegetasi juga menunjukkan hasil penyisihan TC yang signifikan, maka dipastikan bahwa penggunaan media pasir-kerikil sungai berukuran 5–8 mm juga berfungsi efektif dalam penyisihan TC melalui proses penyaringan dan sedimentasi. Mekanisme penyaringan memainkan peran penting dalam pengurangan mikroorganisme patogen, terutama pada HSSF-CW (Karim et al., 2004). Selain itu, efisiensi penyisihan TC tidak bergantung pada jenis filter yang digunakan, namun pada ukuran partikel yang lebih kecil (Redder et al., 2010).

Disamping itu tampak bahwa pada HSSF-CW yang bervegetasi terjadi penurunan konsentrasi TC lebih besar dibanding HSSF-CW tanpa vegetasi, terutama pada waktu retensi hidrolis 1 hari. Ini menunjukkan bahwa vegetasi secara positif mendorong kinerja HSSF-CW dalam penghilangan TC. Adapun penurunan konsentrasi TC pada CW yang ditanami *L. adscenden* dan *E. paniculatus* yang tampak lebih kecil jika dibandingkan dengan penurunan konsentrasi TC pada kontrol, khususnya untuk waktu retensi hidrolis 2 sampai 5 hari, hal ini akibat beban awal pada CW yang ditanami *L. adscenden* dan *E. paniculatus* (>110000 MPN/100ml) jauh lebih besar dibandingkan dengan beban awal pada kontrol (91000 MPN/100ml).

Sejumlah investigasi telah dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh vegetasi terhadap penghilangan bakteri indikator di HSSF-CW. HSSF-CW yang ditanami spesies *M. aquatica* menghasilkan efisiensi penghilangan TC dan *E. coli* dari 0,9 hingga 1,3 unit log lebih besar daripada yang diperoleh di plot percobaan tanpa vegetasi untuk waktu retensi hidrolis 4,5 dan 6,0 hari (Avelar et al., 2014). Selain itu, penghilangan *E. coli* yang lebih besar pada CW yang ditanami dengan *Phragmites australis* (2,6 log<sub>10</sub> CFU/100 mL) dibandingkan dengan sistem tanpa vegetasi (1,4 log<sub>10</sub> CFU/100 mL) (Gaballah et al., 2020). Penghilangan *E. coli* juga ditemukan pada CW yang ditanami dengan *Typha* atau *Phragmites* yang lebih besar lima kali daripada di CW tanpa ditanami tanaman yakni sebesar  $2,35 \times 10^5$  CFU/100 mL berbanding  $0,45 \times 10^5$  CFU/100 mL (Decamp et al., 1999). Adapun hasil dari eksperimen ini, penghilangan TC pada HSSF-CW yang ditanami *T. angustifolia* sebesar  $0,88 \times 10^5$  MPN/100ml untuk waktu retensi hidrolis kurang dari 2 hari. Sementara pada HSSF-CW yang ditanami *L. adscenden* dan *E. paniculatus* penghilangan TC sebesar  $>1,07 \times 10^5$  MPN/100ml untuk waktu retensi hidrolis 4 hari. Untuk membandingkan studi ini dengan studi lainnya sulit dilakukan karena penggunaan substrat yang beragam, desain dan kecepatan aliran air yang berbeda, dan beban hidrolis dan massa yang bervariasi (Karathanasis et al., 2003).

Dengan beban awal sebesar 91.000 MPN/100 ml, penyisihan TC hingga sesuai baku mutu (3.000 MPN/100 ml)

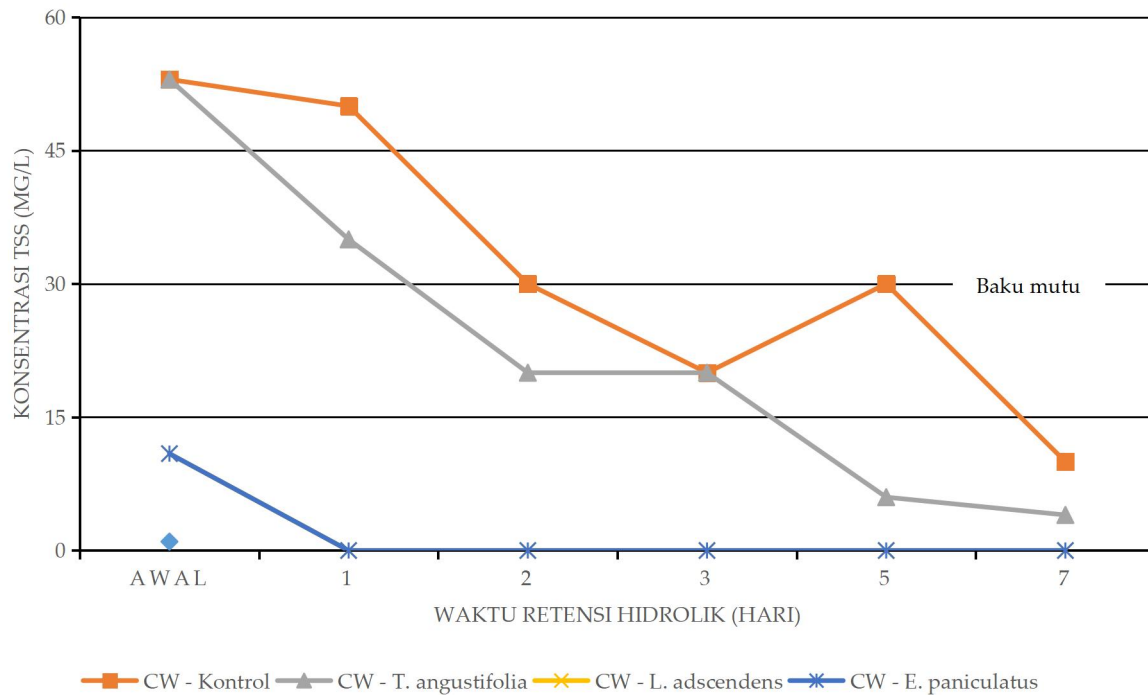
dapat dicapai pada tingkat efisiensi 96,7%, dan untuk beban awal sebesar >110.000 MPN/100 ml pada tingkat efisiensi minimal 97,3%. Pada Tabel 2, tampak bahwa penyisihan TC hingga sesuai baku mutu untuk CW2 dan CW3 yang ditanami *T. angustifolia* dicapai dengan waktu retensi hidrolis kurang dari 2 hari. CW4 yang ditanami *L. adscendens* serta CW5 dan CW6 yang ditanami *E. paniculatus* dicapai dengan waktu retensi 4 hari. Ini menunjukkan bahwa *T. angustifolia* memiliki pengaruh yang lebih baik terhadap penyisihan TC dibandingkan *E. paniculatus*, dan *L. adscendens*. Seperti telah diketahui bahwa *T. angustifolia* dapat mengembangkan *aerenchyma* di korteks akarnya dan melepaskan oksigen sehingga konsentrasi oksigen terlarut meningkat di rizosfer, memfasilitasi degradasi aerobik polutan (Pincam & Jampeetong, 2020).

### 3.2 Penyisihan Total Padatan Tersuspensi (TSS)

Pada CW 1 yang tanpa vegetasi serta CW2 dan CW3 yang ditanami *T. angustifolia* menerima beban awal TSS sebesar 53 mg/L. Adapun untuk CW4 yang ditanami *L. adscendens* serta CW5 dan CW6 yang ditanami *E. paniculatus* menerima beban awal sebesar 10,90 mg/L. Selama proses eksperimen diperoleh efluen dengan konsentrasi TSS seperti pada Gambar 4.

Pada Gambar 4 tampak bahwa semua perlakuan, baik HSSF-CW yang bervegetasi ataupun tanpa vegetasi, terjadi penurunan konsentrasi TSS dengan bertambahnya waktu retensi hidrolis, namun HSSF-CW yang ditanami vegetasi masih lebih baik dalam penyisihan TSS dibandingkan HSSF-CW tanpa vegetasi. Studi yang lain juga hasil sama yang membandingkan kinerja tiga HSSF-CW percontohan yang ditutupi dengan geomembran dan diisi dengan media kerikil, dua ditanam dengan *Vetiveria zizanioides* dan *Phragmites karka*, dan satu tanpa tanaman, dan semuanya beres fasilitas aerasi dalam mengolah air limbah kota. Tingkat pemuatan hidrolis 0,025 m<sup>3</sup>/hari dengan waktu retensi hidrolis 6 hari. Hasil studi ini menunjukkan bahwa *V. zizanioides* memiliki efisiensi penyisihan TSS yang lebih baik (92,3%) dibandingkan *P. karka* (91,3%). Sementara laju penyisihan pada HSSF-CW tanpa tanaman lebih rendah lagi untuk parameter TSS (78%) (Angassa et al., 2018).

Hal di atas membuktikan bahwa peran media dan akar tumbuhan air merupakan dua faktor penting dalam proses penyisihan TSS di HSSF-CW. Fungsi media diantaranya berfokus pada aspek fungsi filtrasi dan intersepsi untuk partikel dan kontaminan yang lebih besar pada sistem HSSF-CW (Ji et al., 2021). Peranan tumbuhan air pada HSSF-CW diantaranya sebagai penahan laju aliran sehingga memudahkan proses sedimentasi padatan, membantu proses filtrasi (terutama bagian perakaran tanaman) (Puspita et al., 2005).



Gambar 4. Grafik konsentrasi TSS efluen menurut perlakuan dan waktu retensi hidrolis

Tabel 3. Konsentrasi DO selama eksperimen menurut perlakuan dan waktu retensi hidrolis

Perlakuan	Konsentrasi Awal (mg/L)	Konsentrasi DO Efluen (mg/L) menurut Waktu Retensi Hidrolis (hari)							Rata-rata (mg/L)
		1	2	3	4	5	6	7	
CW1-Kontrol	3,8	5,2	4,9	4,9	5,2	5,2	4,9	4,5	4,9
CW2- <i>T. angustifolia</i>	3,8	5,4	5,0	5,0	5,2	4,9	5,1	3,8	5,4
CW3- <i>T. angustifolia</i>	3,8	5,1	5,0	4,8	5,2	5,2	5,0	5,0	5,0
CW4- <i>L. adscendens</i>	1,1	4,3	4,4	4,9	5,7	6,2	5,7	5,0	5,2
CW5- <i>E. paniculatus</i>	1,1	4,1	5,4	4,8	4,4	5,4	5,4	4,4	4,8
CW6- <i>E. paniculatus</i>	1,1	4,0	4,3	4,8	4,5	5,4	4,6	4,5	4,6

### 3.3 Konsentrasi DO dan Parameter Lingkungan Lainnya

Parameter lingkungan utama seperti: pH, DO, dan suhu, serta faktor operasional sangat mempengaruhi kinerja HSSF-CW (Kansiime & van Bruggen, 2001). Selama proses eksperimen, terjadi peningkatan konsentrasi oksigen terlarut (DO) pada kisaran 1,1–4,1 mg/L (Tabel 3). Adanya peningkatan konsentrasi DO tersebut diyakini karena faktor kedalaman air yang dangkal pada sel HSSF-CW dan perlakuan resirkulasi air limbah secara kontinyu yang memungkinkan aerasi pasif ekstensif sehingga terjadi difusi oksigen atmosfer (Cooper et al., 1996). Juga terdapat hubungan peningkatan oksigen terlarut dengan kematian patogen di lingkungan akuatik (Fernández et al., 1992).

Vegetasi dan mikroorganisme pada sistem HSSF-CW merupakan komponen biotik yang sangat bergantung pada kondisi parameter lingkungan seperti suhu dan pH. Selama proses eksperimen, tidak terjadi fluktuasi suhu dan pH yang signifikan pada semua perlakuan. Pada eksperimen pertama, parameter suhu stabil pada 30,1 °C dari kondisi awal 30,8 °C dan pH pada kisaran 7,7–8,2 dari kondisi awal 7,7. Pada eksperimen kedua, parameter suhu stabil pada kisaran 25,4–26,4 °C dari kondisi awal 28,4 °C dan pH pada kisaran 8,37–8,84 dari kondisi awal 8,06. Sebagian besar pertumbuhan bakteri mencapai optimal pada suhu sekitar 20–45 °C dan umumnya bakteri bekerja optimum pada rentang pH 6–8 (Prescott, 2008). Juga nutrisi lebih mudah untuk diserap

oleh akar tumbuhan pada kisaran pH netral oleh karena pada kisaran pH tersebut kebanyakan unsur nutrisi larut dalam air. Dengan demikian parameter DO, suhu, dan pH yang ada diyakini memiliki pengaruh positif terhadap proses penghilangan TC dan TSS yang berlangsung pada sistem HSSF-CW eksperimental.

### 4. KESIMPULAN

Tumbuhan *T. angustifolia*, *E. paniculatus*, dan *L. adscendens* secara positif mendorong kinerja HSSF-CW dalam penghilangan total coliform dan TSS. Namun *T. angustifolia* memiliki pengaruh yang lebih baik terhadap penyisihan TC dibandingkan *E. paniculatus*, dan *L. adscendens*. Kinerja sistem Horizontal Sub-surface Flow Constructed Wetland (HSSF-CW) skala percontohan yang ditanami *L. adscendens*, *E. paniculatus*, ataupun *T. angustifolia* dengan strategi operasional yang ditempuh seperti pengaturan kedalaman air pada 0,30 m, laju pemuatan hidrolis maksimal 3,375 m<sup>3</sup>/hari, resirkulasi air limbah secara kontinyu, pemakaian media pasir-kerikil sungai ukuran 5–8 mm, serta penanaman vegetasi dengan jarak yang rapat (*T. angustifolia* dengan kerapatan tanam 53 rumpun per m<sup>2</sup>, *L. adscendens* dengan kerapatan tanam 133 batang per m<sup>2</sup>, *E. paniculatus* dengan kerapatan tanam 13 rumpun per m<sup>2</sup>) terbukti mampu menyisihkan parameter total coliform dan TSS air limbah rumah sakit hingga sesuai baku mutu dalam waktu retensi hidrolis <2 dan 4 hari.

**PERSANTUNAN**

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Rektor Universitas Tadulako atas dukungan pembiayaan penelitian ini melalui Program Hibah DIPA 2021. Penghargaan yang tinggi penulis sampaikan kepada kolega atas bantuan telaah dan diskusi selama penulisan naskah.

**DAFTAR PUSTAKA**

- Akhmad, A. G., Darman, S., Aiyen, & Hamzens, W. P. S. (2020). An Opportunity for Using Constructed Wetland Technology in Hospital Wastewater Treatment: A Preliminary Study. The 2020 International Conference on Science in Engineering and Technology. Palu, Indonesia: IOP.
- Angassa, K., Leta, S., Mulat, W., Kloos, H., & Meers, E. (2018). Organic Matter and Nutrient Removal Performance of Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetlands Planted with Phragmites and Vetiveria Zizanioides for Treating Municipal Wastewater. *Environmental Processes* 5(1):115–30. doi: 10.1007/s40710-017-0276-1.
- Anon. n.d. PerMen LHK No 68 tahun 2016 Baku Mutu Limbah Domestik.Pdf - Google Drive. Retrieved June 22, 2020 (<https://drive.google.com/file/d/1RUG4cMh3KM3bEDtSuN4ZATEd8xSvKxzQ/view>).
- Avelar, F. F., de Matos A. T., de Matos M. P., & Borges, A. C. (2014). Coliform Bacteria Removal from Sewage in Constructed Wetlands Planted with *Mentha Aquatica*. *Environmental Technology* 35(16):2095–2103. doi: 10.1080/09593330.2014.893025.
- Calheiros, C. S. C., Bessa, V. S., Mesquita, R. B. R., Brix, H., Rangel, A. O. S. S., & Castro, P. M. L. (2015). Constructed Wetland with a Polyculture of Ornamental Plants for Wastewater Treatment at a Rural Tourism Facility. *Ecological Engineering* 79:1–7. doi: 10.1016/j.ecoleng.2015.03.001.
- Carraro, E., Bonetta, Si, Bertino, C., Lorenzi, E., Bonetta, Sa, & Gilli, G. (2016). Hospital Effluents Management: Chemical, Physical, Microbiological Risks and Legislation in Different Countries. *Journal of Environmental Management* 168:185–99. doi: 10.1016/j.jenvman.2015.11.021.
- Chandanshive, V. V., Kadam, S. K., Khandare, R. V., Kurade, M. B., Jeon, B., Jadhav, J. P., & Govindwar, S. P. (2018). In Situ Phytoremediation of Dyes from Textile Wastewater Using Garden Ornamental Plants, Effect on Soil Quality and Plant Growth. *Chemosphere* 210:968–76. doi: 10.1016/j.chemosphere.2018.07.064.
- Cooper, P. F., Job, G. D., & Green, M. B. (1996). Reed Beds and Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. Swindon : WRc Swindon.
- Decamp, O., Warren, A., & Sanchez, R. (1999). The Role of Ciliated Protozoa in Subsurface Flow Wetlands and Their Potential as Bioindicators. *Water Science and Technology* 40(3). doi: 10.1016/S0273-1223(99)00444-8.
- Diaz, F. J., O'Geen, A. T. , & Dahlgren, R. A. (2010). Efficacy of Constructed Wetlands for Removal of Bacterial Contamination from Agricultural Return Flows. *Agric. Water Manag* 97(11):1813–1821.
- Fernández, A., Tejedor, C., & Chordi, A. (1992). Effect of Different Factors on the Die-off of Fecal Bacteria in a Stabilization Pond Purification Plant. *Water Research* 26(8):1093–98. doi: 10.1016/0043-1354(92)90145-T.
- Gaballah, M. S., Abdelwahab, O., Barakat, K. M., & Aboagye, D. (2020). A Novel Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetland Planted with *Typha Angustifolia* for Treatment of Polluted Water. *Environmental Science and Pollution Research* 27(22):28449–62. doi: 10.1007/s11356-020-08669-5.
- García, J., Vivar, J., Aromir, M., & Mujeriego, R. (2003). Role of Hydraulic Retention Time and Granular Medium in Microbial Removal in Tertiary Treatment Reed Beds. *Water Research* 37(11):2645–53. doi: 10.1016/S0043-1354(03)00066-6.
- Hasbi, M., Budijono, B. & Hendrizali, A. (2020). Heavy Metal Uptake Capacity By Floating Plant Island in Sail River Pekanbaru. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 430(1):012035. doi: 10.1088/1755-1315/430/1/012035.
- Headley, T, Nivala, J., Kassa, K., Olsson, L., Wallace, S., Brix, H., van Afferden, M., & Müller, R. (2013). *Escherichia Coli* Removal and Internal Dynamics in Subsurface Flow Ecotechnologies: Effects of Design and Plants. *Ecological Engineering* 61:564–74. doi: 10.1016/j.ecoleng.2013.07.062.
- Ji, Z., Tang, W., & Pei, Y. (2021). Constructed Wetland Substrates: A Review on Development, Function Mechanisms, and Application in Contaminants Removal. *Chemosphere* 286:131564. doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.131564.
- Kansiime, F., & van Bruggen, J. J. A. (2001). Distribution and Retention of Faecal Coliforms in the Nakivubo Wetland in Kampala, Uganda. *Water Science and Technology* 44(11–12):199–206. doi: 10.2166/wst.2001.0829.
- Karathanasis, A. D., Potter, C. L., & Coyne, M. S. (2003). Vegetation Effects on Fecal Bacteria, BOD, and Suspended Solids Removal in Constructed Wetlands Treating Domestic Wastewater. *Ecological Engineering* 20(2):157–69. doi: 10.1016/S0925-8574(03)00011-9.
- Karim, M. R., Manshadi, F. D., Karpiscak, M. M., & Gerba, C. P. (2004). The Persistence and Removal of Enteric Pathogens in Constructed Wetlands. *Water Research* 38(7):1831–37. doi: 10.1016/j.watres.2003.12.029.
- Li, Y., Zhang, J., Zhu, G., Liu, Y., Wu, B., Ng, W.J., Appan, A. & Tan, A. S.. (2016). Phytoextraction, Phytotransformation and Rhizodegradation of Ibuprofen Associated with *Typha Angustifolia* in a Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetland. *Water Research* 102:294–304. doi: 10.1016/j.watres.2016.06.049.

- Sandoval-Herazo, L., Alvarado-Lassman, A., Marín-Muñiz, J. L., Méndez-Contreras, J. M., & Zamora-Castro, S. A. (2018). Effects of the Use of Ornamental Plants and Different Substrates in the Removal of Wastewater Pollutants through Microcosms of Constructed Wetlands. *Sustainability* 10(5):1594. doi: 10.3390/su10051594.
- Mara, D. D., & Johnson, M. L. (2006). Aerated Rock Filters for Enhanced Ammonia and Fecal Coliform Removal from Facultative Pond Effluents. *Journal of Environmental Engineering* 132(4):574–77. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9372(2006)132:4(574).
- Marín-Muñiz, J. L., García-González, M. C., Ruelas-Monjardín, L. C., Moreno-Casasola, & Patricia. (2018). Influence of Different Porous Media and Ornamental Vegetation on Wastewater Pollutant Removal in Vertical Subsurface Flow Wetland Microcosms. *Environmental Engineering Science* 35(2):88–94. doi: 10.1089/ees.2017.0061.
- Moshiri, G. A. (2020). *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement*. edited by G. A. Moshiri. CRC Press.
- Ottova, V., Balcarova, J., & Vymazal, J. (1997). Microbial Characteristics of Constructed Wetlands. *Water Science and Technology* 35(5). doi: 10.1016/S0273-1223(97)00060-7.
- Pearson, H. W., Mara, D. D., Mills, S. W., & Smallman, D. J. (1987). Physico-Chemical Parameters Influencing Faecal Bacterial Survival in Waste Stabilization Ponds. *Water Science and Technology* 19(12):145–52. doi: 10.2166/wst.1987.0139.
- Pincam, T., & Jampeetong, A. (2020). Treatment of Anaerobic Digester Effluent Using *Typha Angustifolia* L.: Growth Responses and Treatment Efficiency. *Journal of Water and Environment Technology* 18(2):105–16. doi: 10.2965/jwet.19-045.
- Prescott. (2008). *Microbiology*. 7th ed. USA: McGraw-Hill Book Company.
- Puspita, L., Ratnawati, E., Suryadiputra, I. N. N., & Meutia, A. A. (2005). *Lahan Basah Buatan Di Indonesia*. Bogor: Wetlands International Indonesia Programme dan Ditjen, PHKA.
- Redder, A., Dürr, M., Daeschlein, G., Baeder-Bederski, O., Koch, C., Müller, R. A., Exner, M., & Borneff-Lipp, M. (2010). Constructed Wetlands – Are They Safe in Reducing Protozoan Parasites? *International Journal of Hygiene and Environmental Health* 213(1):72–77. doi: 10.1016/j.ijheh.2009.12.001.
- Richter, A. Y., & Weaver, R. W. (2003). Ultraviolet Disinfection of Effluent from Subsurface Flow Constructed Wetlands. *Environmental Technology* 24(9):1175–82. doi: 10.1080/09593330309385658.
- Saeed, T., & Sun, G. (2012). A Review on Nitrogen and Organics Removal Mechanisms in Subsurface Flow Constructed Wetlands: Dependency on Environmental Parameters, Operating Conditions and Supporting Media. *Journal of Environmental Management* 112:429–48. doi: 10.1016/j.jenvman.2012.08.011.
- Solano, M., Soriano, P., & Ciria, M. (2004). Constructed Wetlands as a Sustainable Solution for Wastewater Treatment in Small Villages. *Biosyst. Eng.* 87(1):109–18. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2003.10.005>.
- Toscano, A., Hellio, C., Marzo, A., Milani, M., Leuret, K., Cirelli, G. L., & Langergraber, G. (2013). Removal Efficiency of a Constructed Wetland Combined with Ultrasound and UV Devices for Wastewater Reuse in Agriculture. *Environmental Technology* 34(15):2327–36. doi: 10.1080/09593330.2013.767284.
- Tuncsipar, B., Ayaz, S., & Akca, L. (2012). Coliform Bacteria Removal from Septic Wastewater in A Pilot-Scale Combined Constructed Wetland System. *Environmental Engineering and Management Journal* 11(10):1873–79. doi: 10.30638/eemj.2012.233.
- USEPA. (2000). *Manual: Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters*. Cincinnati, Ohio 45268: National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency.
- Wu, S., Carvalho, P. N., Müller, J. A., Manoj, V. R., & Dong, R. (2016). Sanitation in Constructed Wetlands: A Review on the Removal of Human Pathogens and Fecal Indicators. *Science of The Total Environment* 541:8–22. doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.09.047.
- Xu, L., Cheng, S., Zhuang, P., Xie, D., Li, S., Liu, D., Li, Z., Wang, F., & Xing, F. (2020). Assessment of the Nutrient Removal Potential of Floating Native and Exotic Aquatic Macrophytes Cultured in Swine Manure Wastewater. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 17(3):1103. doi: 10.3390/ijerph17031103.
- Ye, F., & Li, Y. (2009). Enhancement of Nitrogen Removal in Tower Hybrid Constructed Wetland to Treat Domestic Wastewater for Small Rural Communities. *Ecological Engineering* 35(7):1043–50. doi: 10.1016/j.ecoleng.2009.03.009.