

Kajian Literatur Pengolahan Lindi Tempatkan Pemrosesan Akhir Sampah dengan Teknik Lahan Basah menggunakan Tumbuhan Air

Chusna Fajariyah dan Sarwoko Mangkoedihardjo

Departemen Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

e-mail: sarwoko@enviro.its.ac.id

Abstrak—Lindi yang dihasilkan akibat dari proses dekomposisi sampah dapat mencemari air permukaan dan air tanah. Pemanfaatan lahan basah dengan tumbuhan air merupakan salah satu alternatif pengolahan lindi sebagai pengolahan lanjutan dari proses pengolahan primer, sekunder atau tersier. Tumbuhan air memegang peranan penting dalam proses perbaikan kualitas air limbah, terutama diaplikasikan dalam pengolahan lanjutan lindi. Pengolahan lindi dengan tumbuhan air efektif pada tumbuhan dengan akar panjang dan serabut. Tumbuhan dengan nilai TF dan BCF >1 menunjukkan tumbuhan bersifat hiperakumulator terhadap logam berat. Didapatkan 21 jenis tumbuhan air efektif terhadap pengolahan lindi dengan tingkat konsentrasi yang dapat diterima adalah nitrogen (112-610 mg/L), fosfor (30-75 mg/L), BOD₅ (514-686 mg/L), COD (923,4-1279 mg/L), warna (1817-3360 Pt-Co), dan salinitas (3000-8000 mg/L).

Kata Kunci—Lahan Basah, Pengolahan Lindi, Tumbuhan Air.

I. LATAR BELAKANG

JUMLAH sampah di TPA yang sangat besar menyebabkan tingginya proses dekomposisi sampah secara alamiah yang mengubah sampah menjadi pupuk organik akibat perkolasi air hujan [1], proses biokimia sampah, dan kadar air sampah [2], sehingga melarutkan logam berat dengan hasil samping berupa lindi [3]. Kegagalan yang sering terjadi dalam pengolahan lindi disebabkan tingginya kandungan bahan organik dan anorganik [4], serta upaya pengolahan lindi masih bersifat konvensional, yakni hanya berupa bak-bak pengendapan tanpa pengolahan lanjutan [3]. Salah satu alternatif pengolahan lanjutan adalah pemanfaatan lahan basah (*constructed wetland*) sebagai pengolahan lanjutan atau *polishing treatment* limbah dari proses pengolahan sekunder atau tersier [12][21]. *Constructed wetland* terbukti efisien dalam mengurangi konstituen yang tidak diinginkan seperti BOD, COD, NH₃-N, PO₄-P, dan logam berat dari lindi [5].

Tumbuhan air dalam *constructed wetland* memegang peranan penting dalam proses pemulihan kualitas air limbah secara alamiah (*self purification*) [6]. Jenis tumbuhan air yang terbukti memiliki kemampuan dalam mengolah lindi adalah *Phragmites mauritianus*, *Typha latifolia*, *Nymphaea spontanea*, *Cyperus papyrus*, *Typha angustifolia*, *Limncharis flava*, *Eichhornia crassipes*, *Pistia stratiotes*, *Cyperus haspan* [7], *Scirpus sumatrensis*, *Scirpus mucronatus* [8], *Phragmites australis*, dan *Glyceria maxima* [9].

Berdasarkan fakta tersebut, maka perlu dilakukan kajian literatur terhadap kemampuan tumbuhan air dalam

menurunkan pencemar lindi dengan *constructed wetland*, dan kemungkinan hasil studi untuk dapat diaplikasikan.

II. METODE STUDI

A. Pengumpulan Literatur

Sumber literatur yang digunakan adalah jurnal internasional, jurnal Indonesia, peraturan yang berlaku, tugas akhir, tesis, disertasi, dan *text book* yang berhubungan dengan topik yang dibahas. Beberapa kata kunci pencarian jurnal adalah *constructed wetland systems*, *landfill leachate treatment*, *nutrien removal*, *heavy metal removal*, *organic removal*, *color removal*, *tropical region*, *horizontal subsurface flow*, *vertical subsurface flow*, *surface flow*, *plant harvesting*, *influence of plants*, dan *effect of salinity*.

B. Kajian Literatur

Kajian literatur dilakukan dengan melakukan kajian berdasarkan perbandingan dari studi kasus (TPA Benowo) dengan data literatur yang telah dikumpulkan. Hasil kajian literatur dikelompokkan menjadi: karakteristik lindi, *constructed wetland*, penurunan pencemar organik, penurunan pencemar anorganik, *plant harvesting*, dan studi kasus pengaplikasian *constructed wetland* dengan tumbuhan air. Dari hasil kajian literatur akan diperoleh jenis tumbuhan air yang dapat diaplikasikan di TPA Benowo.

III. KARAKTERISTIK LINDI

A. Karakteristik Lindi

Lindi merupakan cairan dengan bau tidak sedap dan warna gelap yang umumnya mengandung bahan organik dan anorganik tinggi [10]. Karakteristik lindi dipengaruhi oleh umur *landfill* [11], curah hujan dan tingkat perkolasi air yang masuk ke dalam *landfill*, kuantitas sampah, jenis dan komposisi sampah, tingkat stabilisasi *landfill* [12], kelembaban *landfill*, posisi dan waktu pengambilan sampel [13], dan tahapan proses degradasi didalam *landfill* yang terdiri dari fase awal atau fase aerobik-transisi (0-5 tahun), fase pembentukan asam (5-10 tahun), fase fermentasi metan (10-20 tahun), dan fase maturasi akhir (>20 tahun) [4][12]. Karakteristik lindi dapat dilihat pada Tabel 1 [14].

Tabel 1.

Karakteristi lindi berdasarkan umur TPA

Parameter	<1 tahun	1-5 tahun	> 5 tahun
pH	<6,5	6,5-7,5	>7,5
COD (mg/L)	>15000	3000-15000	<3000
BOD ₅ /COD	0,5-1,0	0,1-0,5	<0,1
NH ₃ -N (mg/L)	<400	400	>400
Logam berat (mg/L)	>2	<2	<2
Senyawa organik	80% VFA	(5-30)% VFA+HA+FA	HA+FA

IV. CONSTRUCTED WETLAND

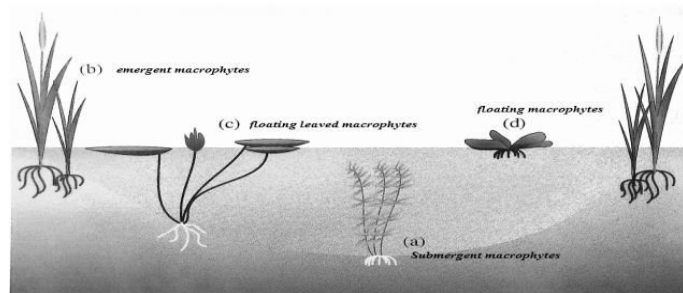
A. Constructed Wetland

Constructed wetland merupakan sistem pengolahan terencana atau terkontrol yang didesain dan dibangun menggunakan proses alami yang melibatkan fungsi vegetasi, media, dan mikroorganisme untuk memanfaatkan banyak proses yang terjadi pada wetland dalam pengolahan air limbah [15]. Proses removal polutan pada sistem wetland adalah sebagai berikut (Tabel 2) [16].

Tabel 2. Proses removal polutan pada sistem wetland

Polutan	Proses
Material organik	Degradasi secara biologis, sedimentasi, serapan mikroba
Kontaminan organik	Adsorpsi, penguapan
SS	Sedimentasi, filtrasi
Nitrogen	Sedimentasi, nitrifikasi-denitrifikasi, serapan tumbuhan dan mikroba
Fosfor	Sedimentasi, filtrasi, adsorpsi, serapan tumbuhan dan mikroba
Bakteri patogen	Kematian secara alami, sedimentasi, filtrasi, UV degradasi, adsorpsi
Logam berat	Sedimentasi, adsorpsi, serapan tumbuhan

Tumbuhan air dalam wetland dibagi menjadi empat kelompok (Gambar 1), yakni emergent plant, submerged plant, floating leaved plant, dan floating plant [17].



Gambar 1. Jenis tumbuhan air berdasarkan pertumbuhan dan kaitannya dengan permukaan air.

Berdasarkan arah aliran, terdapat dua jenis constructed wetland yakni free water surface (FWS) dan subsurface flow (SSF). Sistem SSF CWs terbagi menjadi horizontal subsurface flow (HSSF) dan vertical subsurface flow (VSSF) [47].

V. PENURUNAN KANDUNGAN ANORGANIK

A. Nitrogen dan Fosfor

Penurunan utama nitrogen adalah melalui proses nitrifikasi-

denitrifikasi [18]. Proses nitrifikasi yang lebih panjang pada kondisi aerobik berpengaruh terhadap tingkat pertumbuhan tumbuhan. Kondisi ini menunjukkan bahwa denitrifikasi pada kondisi anaerobik dimungkinkan belum terjadi. Jika dilihat dari keefektifan tumbuhan, kondisi ini menguntungkan dibandingkan kondisi anaerobik.

Penurunan NH₃-N dan NH₄-N dipengaruhi oleh proses nitrifikasi, serapan tumbuhan, aktivitas mikroba aerob, dan media yang digunakan dapat mendukung penurunan terjadi lebih baik. Sistem VSSF CWs menunjukkan penurunan nitrogen lebih besar dibandingkan HSSF CWs dikarenakan suplai oksigen yang lebih mendukung pada sistem vertikal. Hal ini ditunjukkan dari hasil penelitian [19][20] dengan tumbuhan kangkung (*Ipomoeae aquatic*) dan *Typha latifolia* dengan penurunan mencapai 70% oleh *Typha latifolia* dari konsentrasi 122 ± 26,7 mg/L dan 97,77% oleh *Ipomoeae aquatic* dari konsentrasi 610 ± 365,43 mg/L. Kemampuan uptake tumbuhan salah satunya dipengaruhi oleh karakteristik akar yang lebih serabut dan panjang, yang dapat memberikan ruang lebih luas bagi mikroorganisme di akar, sehingga suplai oksigen tinggi dan meningkatkan aktivitas mikroba pada proses nitrifikasi. Seperti pada penelitian [8] *Limncharis flava* dengan akar lebih serabut dan panjang memberikan penurunan lebih besar dibandingkan *Scirpus atrovirens*.

Sehingga tumbuhan air yang berpotensi terhadap penurunan nitrogen adalah tumbuhan genjer (*Limncharis flava*), *Ipomoeae aquatic*, dan *Scirpus validus*. *Typha latifolia* dan *Phragmites australis* memiliki kemampuan penurunan nitrogen lebih tinggi apabila kedua tumbuhan tersebut dilakukan pada sistem single plant. Mixed plant bersifat antagonistik antara *Typha latifolia* dengan *Scirpus validus*, *Carex lacustris*, dan *Phalaris arundinacea* [21]. Sedangkan *Phragmites australis* dengan *Typha orientalis* [22].

Penurunan fosfor dan fosfat (PO₄-P) terjadi melalui proses sedimentasi, adsorpsi, dan aktivitas mikroba, dan serapan tumbuhan [20]. Penelitian [20][23] penurunan fosfor sangat dibatasi oleh jenis media dan ukuran media yang digunakan. Media dengan kandungan Fe, Al, dan Ca dalam jumlah besar dapat memfasilitasi proses presipitasi atau adsorpsi P. Penurunan PO₄-P oleh *Typha latifolia* pada sistem VSSF CWs dengan kombinasi media zeolit, pasir, dan kerikil memberikan penurunan hingga 83% dari konsentrasi 75 mg/L [54]. Penelitian [36] dengan *Typha latifolia* memberikan penurunan fosfor hingga 90% pada sistem HSSF CWs dengan kombinasi media pasir pada konsentrasi 30-50 mg/L. Dari keduanya menunjukkan bahwa penurunan fosfor dipengaruhi oleh media, waktu kontak, dan adanya tumbuhan (penurunan fosfor lebih rendah pada sistem tanpa tumbuhan) [8].

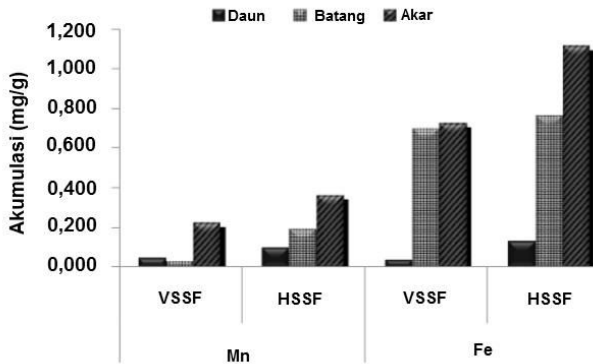
B. Logam Berat

Penyerapan logam berat dalam constructed wetland dapat terjadi dari proses adsorpsi (media) maupun serapan tumbuhan [24] melalui penyerapan, pertukaran kation, filtrasi, dan perubahan kimia melalui akar [25][26].

i) Akumulasi di Jaringan Akar, Batang, dan Daun

Gambar 3 [5] menunjukkan penurunan Fe dan Mn paling

banyak diakumulasi di bagian akar. Hasil ini koheren dengan [24] *Cyperus alternifolius* terhadap akumulasi Fe, Cu, dan Zn, [27] *Canna indica*, *Cyperus alternifolius*, dan *Typha angustifolia* terhadap akumulasi Zn, Ni, Cu, Cr, Co, dan [28] *Limncharis flava* terhadap akumulasi Fe, Mn, dan fosfat. Hal ini dikarenakan akar berperan penting terhadap kemampuan rizofiltrasi kontaminan dibandingkan batang dan daun. Selain itu akar yang lebih panjang dan serabut lebih mampu untuk menciptakan zona aerasi untuk menyerap kontaminan.



Gambar 3. Akumulasi logam berat dalam jaringan *Limncharis flava* setelah 45 hari.

HSSF CWs memiliki penurunan yang lebih besar dibandingkan sistem VSSF CWs karena terkait HRT yang terjadi lebih lama atau lebih panjang pada sistem ini. Selain itu penurunan logam berat pada sistem dengan tumbuhan memberikan penurunan yang lebih besar dibandingkan sistem tanpa tumbuhan.

ii) TF dan BCF

Nilai *Translocation Factor* (TF) digunakan untuk memperkirakan kemampuan kapasitas logam berat yang ditranslokasikan dari akar menuju tunas [26][28]. Nilai TF dapat diperkirakan dengan persamaan sebagai berikut:

$$TF = \frac{C_{tunas}}{C_{akar}} \tag{1}$$

Nilai TF>1 menunjukkan besarnya kemampuan serapan dan translokasi logam berat dari akar menuju tunas, tumbuhan bersifat hiperakumulator terhadap logam berat, dan baik dalam fitoekstraksi atau fitoakumulasi [26]. Tumbuhan dengan nilai TF>1 adalah *Juncus effusus* (Cd, Ni, Pb, Mn, dan Zn) [29], *Typha domingensis* (Pb, Ni, Cd) [31], dan *Eichhornia crassipes* (logam berat Ni, Zn, Cr) [30].

Bioconcentration Factor (BCF) menunjukkan kemampuan biokonsentrasi dari tumbuhan terhadap logam berat di dalam jaringannya. BCF juga menjadi indikator terhadap kemampuan akumulasi oleh tumbuhan. Nilai BCF dapat diperkirakan dengan persamaan sebagai berikut:

$$BCF = \frac{C_{jaringan}}{C_{lindi}} \tag{2}$$

Dimana $C_{jaringan}$ merupakan konsentrasi di seluruh jaringan tumbuhan dinyatakan dalam (mg/kg), dan C_{lindi} merupakan konsentrasi di dalam lindi dinyatakan dalam (mg/L) [31]. Tumbuhan dengan nilai BCF > 1 menunjukkan besarnya kemampuan serapan logam berat dan pertumbuhan yang lebih tinggi. Tumbuhan dengan nilai BCF > 1 adalah *Eichhornia crassipes* terhadap logam berat Ni, Cd, Pb, Cu, dan Cr (BCF 1,42) [31]. Penelitian dari [32] menunjukkan 19 jenis tumbuhan air dengan nilai BCF >1 yakni *Alternanthera philoxeroides*, *Zizania latifolia*, *Echinochloa crus-galli*, *Polygonum hydropiper* (terhadap logam berat Cd, Pb, Zn), *Monochoria vaginalis* (Cd dan Pb), *Isachne globosa* (Cd dan Zn), *Digitaria sanguinalis*, *Fimbristylis miliacea* (Zn).

iii) Hubungan TF dan BCF

Fitoakumulasi oleh tumbuhan ditentukan dengan menghitung nilai BCF dan TF untuk dapat membedakan mekanisme akumulasi yang terjadi, yakni [33]:

Nilai BCF>1 dan TF <1 (mekanisme fitostabilisasi)

Nilai BCF<1 dan TF >1 (mekanisme fitoekstraksi)

Tumbuhan dibagi dalam 3 kategori terkait nilai BCF dan TF, yakni [45]:

BCF>1 (tumbuhan akumulator)

BCF<1 (tumbuhan *excluder*)

BCF mendekati 1 (indikator)

TF>1 (mekanisme fitoekstraksi)

TF<1 (mekanisme fitostabilisasi)

Penelitian dari [29][28], menunjukkan variasi nilai TF dan BCF dari tumbuhan *Juncus effusus*, *Phragmites australis*, *Canna indica*, *Typha angustifolia*, dan *Cyperus alternifolius* terhadap logam berat Cd, Cr, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn, Cu, dan Co. *Juncus effusus* memiliki kemampuan translokasi lebih besar dibandingkan *Phragmites australis* dengan rata-rata nilai TF>1 namun kemampuan akumulasi (BCF) <1. Sedangkan *Phragmites australis* nilai TF >1 hanya pada logam berat Mn dan Pb. *Canna indica*, *Typha angustifolia*, dan *Cyperus alternifolius* dari penelitian [28] menunjukkan nilai TF<1 terhadap seluruh logam berat namun memberikan nilai BCF>1. Dari penelitian diatas menunjukkan bahwa peningkatan nilai TF tidak berhubungan dengan peningkatan nilai BCF.

VI. PENURUNAN KANDUNGAN ORGANIK

A. BOD dan COD

Kandungan organik lindi umumnya diukur sebagai BOD dan COD. Penurunan BOD dan COD pada sistem SSF CWs dengan *Cyperus alternifolius* mencapai 64% dari konsentrasi masing-masing 514 mg/L dan 1279 mg/L pada sistem HSSF CWs [34]. Penelitian dari [7] juga memberikan hasil yang koheren dimana penurunan oleh *Cyperus haspan* paling besar pada sistem HSSF CWs. *Cyperus haspan* mampu menurunkan BOD hingga 60,8-78,7% dan COD 59,7-98,8% dari konsentrasi BOD 686 mg/L dan COD 923,4 mg/L selama 21 hari. Dari keduanya menunjukkan bahwa HSSF CWs lebih baik terhadap penurunan BOD dan COD dibandingkan sistem VSSF CWs dikarenakan waktu kontak yang lebih lama atau lebih panjang antara mikroba dengan kontaminan.

Konsentrasi awal BOD dan COD menentukan tingkat biodegradabilitas lindi. Rasio BOD/COD dibagi menjadi 3 zona yakni zona toksik (BOD/COD <0,1), zona *biodegradable* (BOD/COD 0,1-1,0), dan zona stabil (BOD/COD >1,0 namun kandungan organik aman untuk lingkungan) [35]. Pengaruh tingkat biodegradabilitas lindi terhadap kemampuan serapan tumbuhan ditunjukkan dari penelitian [36] dengan *Typha angustifolia*, efisiensi pengolahan menurun sekitar 27% pada lindi tua. Hasil yang koheren juga ditunjukkan dari penelitian dan [20] *Typha latifolia* pada sistem HSSF CWs yakni sekitar 35,7% dari konsentrasi COD 211,8 mg/L. Hal ini disebabkan adanya kandungan organik yang tidak terurai pada lindi stabil menyebabkan penurunan rasio BOD/COD (<0,1) [37] sehingga lindi bermutu toksik dengan tingkat biodegradabilitas rendah [38] serta mikroba dari *landfill* tua sudah tidak aktif. Lindi dengan BOD/COD >0,1, penurunan BOD dan COD oleh *Typha angustifolia* mencapai 91% dan 81,6% pada HRT 8 hari dari konsentrasi awal BOD 130 mg/L dan COD 385 mg/L [39]. Penurunan mencapai 94% pada konsentrasi BOD 141,21 mg/L dan COD 661,65 mg/L oleh [40].

Tumbuhan memberikan efek terhadap jumlah oksigen yang tersedia dalam media, sehingga dapat mendukung pertumbuhan mikroba dan porositas media lebih besar karena pengaruh akar tumbuhan, serta dapat menaikkan biodegradabilitas lindi. Pengaruh akar tumbuhan ditunjukkan oleh [16], penurunan oleh *Ericaulon sexangulora* dengan akar lebih panjang dan serabut lebih besar dibandingkan *Scirpus globulosus*. Penurunan mencapai >85% setelah 18 hari pada konsentrasi BOD 950 mg/L dan COD 350 mg/L. Dari beberapa penelitian diatas, didapatkan *Cyperus haspan*, *Cyperus alternifolius*, *Typha angustifolia*, dan *Ericaulon sexangulora* dapat dijadikan rekomendasi terhadap penurunan BOD dan COD pada konsentrasi BOD 514-686 mg/L dan COD 923,4-1279 mg/L.

B. Warna

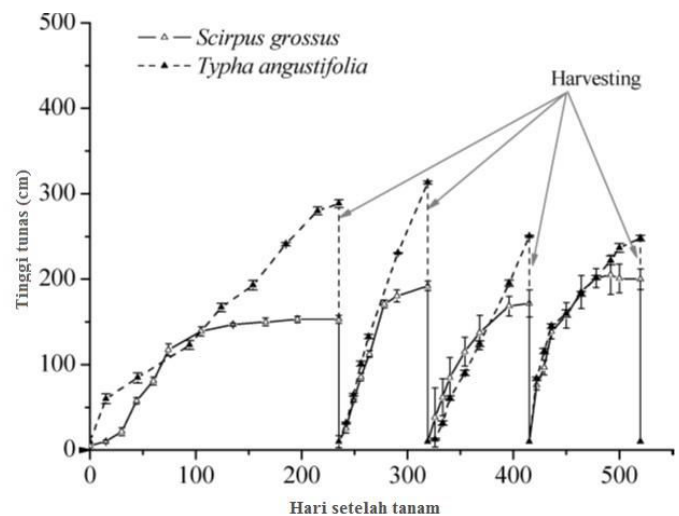
Warna lindi menggambarkan besarnya konsentrasi bahan organik pada lindi. Semakin pekat warna lindi maka semakin tinggi kandungan bahan organik didalamnya (diukur sebagai COD) yang menandakan rendahnya rasio BOD₅/COD, kekeruhan, dan *suspended solid* [2][29]. Warna lindi juga disebabkan oleh oksidasi Fe dari Fe²⁺ menjadi Fe³⁺ dan pembentukan koloid besi hidroksida (Fe(OH)₃) dan kompleks dengan zat fulvat/humat (lindi berwarna kemerahan) [41]. Intensitas warna lindi pada *landfill* muda adalah pada rentang 2430-8180 Pt-Co [42]. Sedangkan pada *landfill* tua intensitas warna meningkat yakni 7200-9250 Pt-Co [43][44].

Hasil penelitian [26][7] menunjukkan bahwa penurunan warna berbanding lurus dengan meningkatnya waktu kontak. Waktu kontak optimum terhadap penurunan warna oleh *Typha domingensis* pada sistem VSSF CWs terjadi pada waktu kontak 42 jam dengan penurunan mencapai 68,92% pada intensitas warna 1817 Pt-Co. *Cyperus haspan* pada sistem VSSF CWs penurunan selama 21 hari mencapai 86,6% pada konsentrasi 3360 Pt-Co. Sedangkan penelitian dari [39], menunjukkan penurunan optimum *Typha angustifolia* hanya

mencapai 45% pada intensitas warna yang lebih rendah (137 Pt-Co). Sehingga *Typha domingensis* dan *Cyperus haspan* dapat dijadikan rekomendasi terhadap penurunan warna dengan *constructed wetland*.

VII. PLANT HARVESTING

Plant harvesting merupakan salah satu strategi untuk meningkatkan pertumbuhan tumbuhan dan kinerja *constructed wetland* yang dapat dilakukan tahunan (*annual harvesting*) dan berganda (*multiple harvesting*). *Harvesting* dapat dilakukan ketika tumbuhan telah berada pada siklus akhir tumbuhnya. Pengulangan pemanenan terbukti dapat meningkatkan jumlah nutrisi yang dapat diturunkan [45]. Tumbuhan yang memungkinkan dilakukan *multiple harvesting* adalah *Phalaris arundinacea* [45], *Scirpus grossus* dan *Typha angustifolia* (Gambar1) [46]. *Scirpus grossus* membutuhkan waktu lebih cepat untuk mencapai produktivitas maksimal yakni sekitar 5 bulan pada pertumbuhan awal, sedangkan *Typha angustifolia* membutuhkan sekitar 8 bulan.



Gambar 4. Perubahan tinggi tunas *Scirpus grossus* dan *Typha angustifolia* setelah 4 kali *harvesting*.

Keberhasilan awal pertumbuhan merupakan faktor penting terhadap keberhasilan pertumbuhan selanjutnya [46]. Setelah dilakukan pemanenan, tumbuhan menyimpan energi di bagian akar untuk regenerasi tunas [47]. Spesies tumbuhan yang baik untuk dilakukan *harvesting* sebaiknya adalah tumbuhan yang memiliki pertumbuhan yang cepat [48]. Hal ini menunjukkan tumbuhan memiliki kemampuan yang lebih cepat untuk mencapai produktivitas maksimal dalam penyerapan polutan. Pemilihan metode *harvesting* dapat dipertimbangkan berdasarkan kemudahan operasi, peralatan, SDM, biaya, dan manfaat dari hasil *harvesting*.

VIII. STUDI KASUS

TPA Benowo merupakan TPA yang melayani pembuangan sampah Kota Surabaya dan telah beroperasi dari tahun 2001. Luas lahan TPA sekitar 37,4 Ha dengan sampah yang diterima

sekitar 6064 ton/hari [49][50]. Karakteristik lindi TPA Benowo mengandung klorida (Cl⁻) tinggi yakni 10300 mg/L diakibatkan lokasi TPA dekat tambak garam yang sehingga air tanah mengandung garam tinggi akibat dari infiltrasi air laut dan terakumulasi ke dalam lindi. Konsentrasi salinitas salah satunya dipengaruhi kandungan Cl⁻. Lindi dengan salinitas tinggi menyebabkan tumbuhan sebagai pengolah lindi secara biologis tidak dapat menguraikan bahan organik sehingga mengakibatkan penurunan efisiensi pengolahan [51] dan sifat toksik tumbuhan [31]. Dari beberapa hasil penelitian, tumbuhan yang mampu bertahan pada kondisi salin adalah Enceng gondok (*Eichhornia crassipes*) mampu bertahan pada konsentrasi salinitas 560-3000 mg/L [31][52]. Rumput bebek (*Lemna minor*) pada konsentrasi salinitas 3000-7000 mg/L, dan Lembang (*Typha domingensis*) pada konsentrasi salinitas hingga 8000 mg/L [53]. Sehingga spesies tersebut dapat dijadikan rekomendasi di TPA Benowo sebagai pengolahan lanjutan lindi dengan *constructed wetland*. Selain karena kemampuannya pada kondisi salin, tumbuhan tersebut tersebar di Indonesia, tingkat pertumbuhan cepat, dan kemampuan terhadap penurunan parameter lain. *Typha angustifolia* memiliki kemampuan terhadap penurunan BOD, COD, N, dan P mencapai >90% [39][40]. *Eichhornia crassipes* terhadap penurunan Ni, Zn, Cr, dan Cd, TSS, TDS, dan kandungan organik [51]. *Lemna minor* terhadap penurunan Mn, Pb, Ni, Cu, Cr, dan Cd mencapai >50% [32].

IX. KESIMPULAN/RINGKASAN

Pengolahan lindi dengan tumbuhan air efektif pada tumbuhan dengan akar panjang dan serabut. *Limncharis flava*, *Ipomoeae aquatica*, dan *Scirpus validus* efektif terhadap penurunan nitrogen mencapai >90% pada konsentrasi 112-610 mg/L. *Typha latifolia* efektif terhadap penurunan fosfor mencapai 90% pada konsentrasi 30-75 mg/L. *Cyperus haspan*, *Cyperus alternifolius*, *Eriocaulon sexangulare* dan *Typha angustifolia* efektif terhadap penurunan BOD dan COD mencapai >60% pada konsentrasi BOD₅ 514-686 mg/L dan COD 923,4-1279 mg/L. *Cyperus haspan* dan *Typha domingensis* efektif terhadap penurunan warna lindi pada rentang 1817-3360 Pt-Co. *Typha angustifolia*, *Eichhornia crassipes*, dan *Lemna minor* efektif terhadap lindi dengan salinitas tinggi (salinitas yang dapat diterima masing-masing adalah 8000 mg/L, 3000 mg/L, dan 7000 mg/L). Tumbuhan dengan nilai TF dan BCF >1 bersifat hiperakumulator terhadap logam berat. Tumbuhan dengan nilai TF>1 adalah *Eichhornia crassipes*, *Typha domingensis*, dan *Juncus effusus*. Tumbuhan dengan nilai BCF>1 adalah *Alternanthera philoxeroides*, *Zizania latifolia*, *Echinochloa crus-galli*, *Polygonum hydropiper*, *Monochoria vaginalis*, *Isachne globosa*, *Digitaria sanguinalis*, *Fimbristylis miliacea*, *Eichhornia crassipes*, dan *Canna indica*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada segenap pihak di

Jurusan Teknik Lingkungan FTSP ITS, atas bantuan dan dukungan dalam penyelesaian studi literatur ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Al-Hamadani, Y. A.J., M. S. Yusoff, M. Umar, Bashir, and M. J.K., "Application of Psyllium Husk as Coagulant and Coagulant Aid in Semi-Aerobic Landfill Leachate Treatment," *J. Hazard. Mater.*, vol. 190, pp. 582-587, 2011.
- [2] S. Renou, J. G. Givaudan, S. Poulain, F. Dirassouyan, and P. Moulin, "Landfill Leachate Treatment: Review and Opportunity," *J. Hazard. Mater.*, vol. 150, pp. 468-493, 2008.
- [3] M. S. Anam, E. M.H., Kurniati, and B. Suharto, "Penurunan Kandungan Logam Pb dan Cr Leachate Melalui Fitoremediasi Bambu Air (*Equisetum hyemale*) dan Zeolit," *J. Keteknikan Pertan. Trop. dan Biosist.*, vol. 1, pp. 43-59, 2013.
- [4] S. Q. Aziz, H. A. Aziz, M. S. Yusoff, M. J. K. Bashir, and M. Umar, "Leachate Characterization in Semi Aerobic and Anaerobic Sanitary Landfill: A Comparative Study," *J. Environ. Manage.*, vol. 91, pp. 2608-2614, 2010.
- [5] A. N. Kamarudzaman, M. A. H. Zakaria, R. A. Aziz, and M. F. A. Jalil, "Study the Accumulation of Nutrients and Heavy Metals in the Plant Tissues of *Limncharis flava* Planted in Both Vertical and Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetland," *IPCBE*, vol. 12, pp. 50-54, 2011.
- [6] H. Suprihatin, "Penurunan Konsentrasi BOD Limbah Domestik menggunakan Sistem Wetland dengan Tanaman Hias Bintang Air (*Cyperus alternifolius*)," *Din. Lingkung. Indones.*, vol. 1, pp. 80-87, 2014.
- [7] C. O. Akinbile, M. S. Yusoff, and A. Z. A. Zuki, "Landfill Leachate Treatment using Sub-Surface Flow Constructed Wetland by *Cyperus haspan*," *Waste Manag.*, vol. 32, pp. 1387-1393, 2012.
- [8] A. N. Kamarudzaman, N. S. Ismail, and R. A. Aziz, "Removal of Nutrients from Landfill Leachate Using Subsurface Flow Constructed Wetland Planted with *Limncharis flava* and *Scirpus atrovirens*. Proceeding International," in *Proceeding International Conference on Environmental and Computer Science*, 2011.
- [9] A. Bialowiec, L. Davies, A. Albuquerque, and P. F. Randserson, "Nitrogen Removal from Landfill Leachate in Constructed Wetlands with Reed and Willow: Redox Potential in the Root Zone," *J. Environ. Manage.*, vol. 97, pp. 22-27, 2012.
- [10] P. Yao, "Perspectives on Technology for Landfill Leachate Treatment," *Arab. J. Chem.*, pp. 1-8, 2013.
- [11] D. Kulikowska and E. Klimiuk, "The Effect of Landfill Age on Municipal Leachate Composition," *Bioresour. Technol.*, vol. 99, pp. 5981-5985, 2008.
- [12] E. M. Pajoo, D. Weichgrebe, and G. Cuff, "Municipal Landfill Leachate Characteristics and Feasibility of Retrofitting Existing Treatment Systems with Deammonification-A Full Scale Survey," *J. Environ. Manage.*, vol. 187, pp. 354-364, 2017.
- [13] E. Damanhuri, "Diktat Kuliah Perancangan Landfill," Bandung, 2012.
- [14] A. A. Abbas, G. Jingsong, Z. P.L., Y. Y.P., and W. S. Alrekabi, "Review on Landfill Leachate Treatments," *Am. J. Appl. Sci.*, vol. 6, pp. 672-684, 2009.
- [15] D. Q. Zhang, K. B. S. N. Jinadasa, R. M. Gersberg, Y. Liu, and W. J. Tan, S.K., Ng, "Application of Constructed Wetlands for Wastewater Treatment in Tropical and Subtropical Regions (2000-2013)," *J. Environ. Sci.*, vol. 30, pp. 30-46, 2015.
- [16] Z. Ujang, E. Soejono, M. R. Salim, and R. B. Shutes, "Landfill Leachate Treatment by an Experimental Subsurface Flow Constructed Wetland in Tropical Climate Countries," *Water Sci. Technol.*, vol. 52, no. 12, pp. 243-250, 2005.
- [17] N. Tanaka and K. B. S. N. W.J. Jinadasa, *Wetlands for Tropical Applications; Wastewater Treatment by Constructed Wetland*. London: Imperial Collage Press, 2011.
- [18] C. . Lee, T. D. Fletcher, and G. Sun, "Nitrogen Removal in Constructed Wetland Systems," *Eng. Life Sci.*, vol. 1, pp. 11-22, 2009.
- [19] O. O. Aluko and M. K. . Sridhar, "Application of Constructed Wetlands to the Treatment of Leachates from a Municipal Solid

- Waste Landfill in Ibadan, Nigeria,” *J. Environ. Health*, vol. 6, no. 10, pp. 58–62, 2005.
- [20] A. Yalcuk and A. Ugurlu, “Comparison of Horizontal and Vertical Constructed Wetland System for Landfill Leachate Treatment,” *Bioresour. Technol.*, vol. 100, pp. 2521–2526, 2009.
- [21] L. H. Fraser, S. M. Carty, and D. Steer, “A Test of Four Plant Species to Reduce Total Nitrogen and total Phosphorus from Soil Leachate in Subsurface Wetland Microcosms,” *Bioresour. Technol.*, vol. 94, pp. 185–192, 2004.
- [22] L. Yang and K. . Tsai, “Treatment of Landfill Leachate with High Levels of Ammonia by Constructed Wetland Systems,” *J. Environ. Sci. Heal. Part A*, vol. 46, pp. 736–741, 2011.
- [23] A. M. Noor, L. C. Shiam, F. W. Hong, S. Soetardjo, and H. P. S. A. Khalil, “Application of Vegetated Constructed Wetland with Different Filter Media for Removal of Ammoniacal Nitrogen and Total Phosphorus in Landfill Leachate,” *Int. J. Chem. Eng. Appl.*, vol. 1, no. 3, pp. 270–275, 2010.
- [24] A. N. Kamaruzaman, R. A. Aziz, and M. F. A. Jalil, “Removal of Heavy Metals from Landfill Leachate using Horizontal and Vertical Subsurface Flow Constructed Wetland Planted with *Limncharis flava*,” *Int. J. Civ. Environ. Eng. IJCEE-IJENS*, vol. 11, pp. 73–79, 2011.
- [25] A. Mojiri, H. A. Aziz, M. A. Zahed, S. Q. Aziz, and R. B. M. Selamat, “Phytoremediation of Heavy Metals from Urban Waste Leachate by Southern Cattail (*Typha domingensis*),” *Int. J. Sci. Res. Environ. Sci.*, vol. 1, no. 4, pp. 63–70, 2013.
- [26] A. Mojiri, L. Ziyang, R. M. Tajuddin, H. Faraji, and N. Alifar, “Co-Treatment of Landfill Leachate and Municipal Wastewater using the ZELIAC/Zeolit Constructed Wetland System,” *J. Environ. Manage.*, vol. 166, pp. 124–130, 2016.
- [27] M. A. Khapre, “Removal of Heavy Metal from Landfill Leachate using Vertical Flow Construction Wetland,” *IOSR J. Mech. Civ. Eng.*, pp. 46–51, 2015.
- [28] A. K. Yadav, R. Abbassi, N. Kumar, S. Satya, T. R. Sreekrishnan, and B. K. Mishra, “The Removal of Heavy Metals in Wetland Microcosms: Effects of Bed Depth, Plant Species, and Metal Mobility,” *Chem. Eng. J.*, vol. 212, pp. 501–507, 2012.
- [29] A. D. Oka, M. Fujii, Y. Soda, S. Ishigaki, T. Machimura, and M. T. Ike, “Removal of Heavy Metals from Synthetic Landfill Leachate in Lab-Scale Vertical Flow Constructed Wetlands,” *Sci. Total Environ.*, pp. 742–750, 2017.
- [30] S. Verma, B. Mishra, R.Pandit, A. Chatterjee, S. S. Jadhav, P. S. Gaoture, and P. H. Sarode, “Treatment of Landfill Leachate by Phytoremediation,” *Int. J. Eng. Res. Gen. Sci.*, vol. 3, pp. 1234–1237, 2015.
- [31] A. S. El-Gendy, N. Biswas, and J. K. Bewtra, “A Floating Aquatic System Employing Water Hyacinth for Municipal Landfill Leachate Treatment: Effect of Leachate Characteristics on the Plant Growth,” *J. Environ. Eng. Sci.*, vol. 4, pp. 227–240, 2005.
- [32] J. Liu, Y. Dong, H. Xu, D. Wang, and J. Xu, “Accumulation of Cd, Pb, and Zn by 19 Wetland Plant Species in Constructed Wetland,” *J. Hazardous Mater.*, vol. 147, pp. 947–953, 2007.
- [33] Yafyet, S. Liong, and Y. Hala, “Fitoakumulasi Cr dan Pb dalam Tumbuhan Bakau *Rhizophora mucronata* di Daerah Aliran Sungai Tallo Makassar,” Makassar, 2016.
- [34] S. Usman and I. Santosa, “Pengolahan Air Limbah Sampah (Lindi) dari Tempat Pembuangan Akhir Sampah (TPA) menggunakan Metoda Constructed Wetland,” *J. Kesehat.*, vol. 5, no. 2, pp. 98–108, 2014.
- [35] G. Samudro and S. Mangkoedihardjo, “Review nn BOD, COD and BOD/COD Ratio: a Triangle Zone for Toxic, Biodegradable and Stable Levels,” *Int. J. Acad. Res.*, vol. 2, no. 4, pp. 235–239, 2010.
- [36] C. Chiemchaisri, W. Chiemchaisri, J. Junsod, and P. . Threedeach, S. Wicranarachchi, “No Title,” *Bioresour. Technol.*, vol. 100, pp. 3808–3814, 2009.
- [37] E. Klimiuk and D. Kulikowska, “The Influence of Hydraulic Retention Time and Sludge Age on the Kinetics of Nitrogen Removal from Leachate in SBR,” *Polish J. Environ. Stud.*, vol. 1, no. 2, pp. 283–289, 2006.
- [38] S. Mangkoedihardjo and G. Samudro, *Fitoteknologi Terapan*. Yogyakarta: Graha Ilmu, 2010.
- [39] V. Sawaitayothin and C. Polprasert, “Nitrogen Mass Balance and Microbial Analysis of Constructed Wetlands Treating Municipal Landfill Leachate,” *Biosource Technol.*, vol. 98, pp. 565–570, 2007.
- [40] T. D. Ariny and T. Zaman, B. Istirokhatun, “Penyisihan BOD dan COD dalam Lindi pada Constructed Wetland menggunakan *Typha angustifolia* dengan Pengaruh Debit dan Jumlah Tumbuhan yang Berbeda (Studi Kasus: Tempat Pembuangan Sampah Kawasan Industri Terboyo, Semarang, Jawa Tengah),” *J. Tek. Lingkung.*, vol. 3, no. 4, pp. 1–19, 2014.
- [41] E. Nagarajan, R. Thirumalaisamy, S. Lakshumanan, “Impact of Leachate on Groundwater Pollution due to non-Engineered Municipal Solid Waste Landfill Sites of Erode City, Tamil Nadu, India,” *Iran. J. Environ. Heal. Sci. Eng.*, vol. 9, pp. 35–41, 2012.
- [42] H. A. Aziz, S. Alias, M. N. Adlan, F. A. H. Asaari, and M. S. M. Zahari, “Colour Removal from Landfill Leachate by Coagulation and Flocculation Processes,” *Bioresour. Technol.*, vol. 98, pp. 218–220, 2007.
- [43] N. B. Azmi, M. J. K. Bashir, S. Sethupathi, L. J. We, and N. C. Aun, “Stabilized Landfill Leachate Treatment by Sugarcane Bagasse Derived Activated Carbon for Removal of Color, COD and NH₃-N – Optimization of Preparation Condition by RSM,” *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 513, pp. 1–8, 2014.
- [44] E. Papastavrou, C. Mantzavinos, D. Diamadopulos, “A Comparative Treatment of Stabilized Landfill Leachate: Coagulation and Activated Carbon Adsorption vs Electrochemical Oxidation,” *Environ. Technol.*, vol. 10, no. 14, pp. 1547–1553, 2009.
- [45] J. Vymazal, L. Kröpfelová, J. Švehla, and J. Štíchlorová, “Can Multiple Harvest of Above Ground Biomass Enhance Removal of Trace Elements in Constructed Wetlands Receiving Municipal Sewage?,” *Ecol. Eng.*, vol. 36, pp. 939–945, 2010.
- [46] K. B. S. N. Jinadasa, N. Tanaka, S. Sasikala, M. I. M. Werellagama, D.R.I.B. Mowjood, and W. J. Ng, “Impact of Harvesting on Constructed Wetlands Performance—A Comparison between *Scirpus grossus* and *Typha angustifolia*,” *J. Environ. Sci. Heal.*, vol. 43, pp. 664–671, 2008.
- [47] P. K. Pal, M. Mahajan, R. Prasad, V. Pathania, B. Singh, and P. S. Ahuja, “Harvesting Regimes to Optimize Yield and Quality in Annual and Perennial *Stevia rebaudiana* under Sub-Temperate Condition,” *Ind. Crop. Prod.*, vol. 65, pp. 556–564, 2015.
- [48] A. C. Osorio, H. Vega, J. C. Lancheros, H. A. C. Martínez, and J. E. Mosquera, “Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetland Removal Efficiency using *Cyperus articulatus* L,” *Ecol. Eng.*, vol. 99, pp. 479–485, 2017.
- [49] M. Kawai, I. F. Purwanti, N. Nagao, A. Slamet, J. Hermana, and T. Toda, “Seasonal Variation in Chemical Properties and Degradability by Anaerobic Digestion of Landfill Leachate at Benowo in Surabaya, Indonesia,” *J. Environ. Manage.*, vol. 110, pp. 267–275, 2012.
- [50] Sarbidi, “Kajian Regionalisasi Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) Sampah menggunakan Metode Analisis SWOT (Studi Kasus TPA Benowo Surabaya),” *J. Permukiman*, vol. 4, no. 1, pp. 10–22.
- [51] A. C. Ni’am and I. Warmadewanthi, “Efektifitas *Typha angustifolia* dan *Eichhornia crassipes* dalam Mengolah Leachate dengan Sistem Constructed Wetland,” in *Prosiding Seminar Nasional Manajemen Teknologi XVIII*, 2013.
- [52] A. K. Hidayati, “Pemanfaatan Eceng Gondok (*Eichhornia crassipes*) untuk Penyisihan Polutan pada Lindi (Studi Kasus: TPA Benowo),” Surabaya, 2011.
- [53] K. Morris, “Salinity and Nutrients; Growth and Water use of Aquatic Macrophytes under Controlled and Natural Conditions,” University of Adelaide, 1998.