

Pengolahan Air Limbah Budidaya Berbasis IMTA (Integrated Multi Trophic Aquaculture) Menggunakan Constructed Treatment Wetland – Surface Flow System

Evi Susanti^{*1}, Sari Wulandari², Cynthia Henny¹, Irma Melati¹

¹Puslit Limnologi-LIPI, Jl, Jakarta-Bogor Km 46, 16911, Cibinong, Jawa Barat

²Mahasiswa Manajemen Sumberdaya Perairan – Universitas Brawijaya

*Email: evi@limnologi.lipi.go.id

Abstrak

Air limbah IMTA yang dihasilkan dari kegiatan budidaya ikan di Pusat Penelitian Limnologi memiliki karakteristik limbah dengan konsentrasi nitrogen dan fosfor yang tinggi. Kondisi ini menyebabkan terjadinya ledakan populasi mikroalga Cyanobacteria dari jenis *Microcystis aeruginosa* dan *Oscillatoria* sp pada air kolam budidaya tersebut. Salah satu teknologi alternatif yang dapat diaplikasikan untuk mengolah air limbah budidaya tersebut adalah sistem *constructed treatment wetlands* (CTWs) yang diuji menggunakan tumbuhan air *Heliconia* sp dan *Cyperus* sp. CTWs merupakan kombinasi pengolahan biofilter dan fitoteknologi. Penelitian ini bertujuan untuk menurunkan konsentrasi nitrogen, fosfor dan TSS air limbah budidaya IMTA. CTWs yang digunakan adalah tipe aliran permukaan (*surface flow system* - SFS) yang dilengkapi dengan kolam *trickling filter*. Kolam CTWs memiliki dimensi dengan diameter 2,00 m² dan kedalaman 0,55 m yang berisi media kerikil 1,884 m³, pasir 1,256 m³ dan tanah 0,314 m³. Kolam *trickling filter* berisi batu kerikil dengan dimensi 2,00 x 1,00 m² dan kedalaman 0,50 m. Waktu tinggal air limbah pada sistem berkisar antara 4 – 6 hari. Pengamatan dilakukan setiap 7 hari meliputi parameter fisika kimia air serta pengukuran jumlah bakteri pada akar setiap 30 hari. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa kolam *trickling filter* mampu menurunkan kandungan total nitrogen, total fosfor dan fosfat rata-rata sebesar 22,1%, 36,04% dan 61,16%. Penurunan konsentrasi total nitrogen pada kolam *Heliconia* sp sebesar 36,54 – 57,95% dan 44,12 – 76,87% pada kolam *Cyperus* sp, dengan beban pencemar yang masuk pada sistem CTWs berkisar antara 28,3 – 35,3 mg–TN/L. Efisiensi penyisihan fosfat berkisar antara 90,58 – 96,98% pada kolam *Heliconia* sp dan 94,71– 97,17% pada kolam *Cyperus* sp, dengan beban masukan hingga 1,33 mg–PO₄³⁻/L. Berdasarkan uji bakteri diperoleh jumlah bakteri heterotrof pada akar *Cyperus* sp lebih tinggi dibandingkan pada akar *Heliconia* sp, hal ini yang menyebabkan penyisihan nitrogen pada kolam *Cyperus* sp lebih tinggi dibandingkan pada kolam *Heliconia* sp. TSS mengalami penurunan pada kolam *trickling filter*, *Heliconia* sp dan *Cyperus* sp berturut-turut hingga 78,3%, 66% dan 84%.

Kata kunci: CTWs, SFS, *Heliconia* sp, *Cyperus* sp, IMTA

Pendahuluan

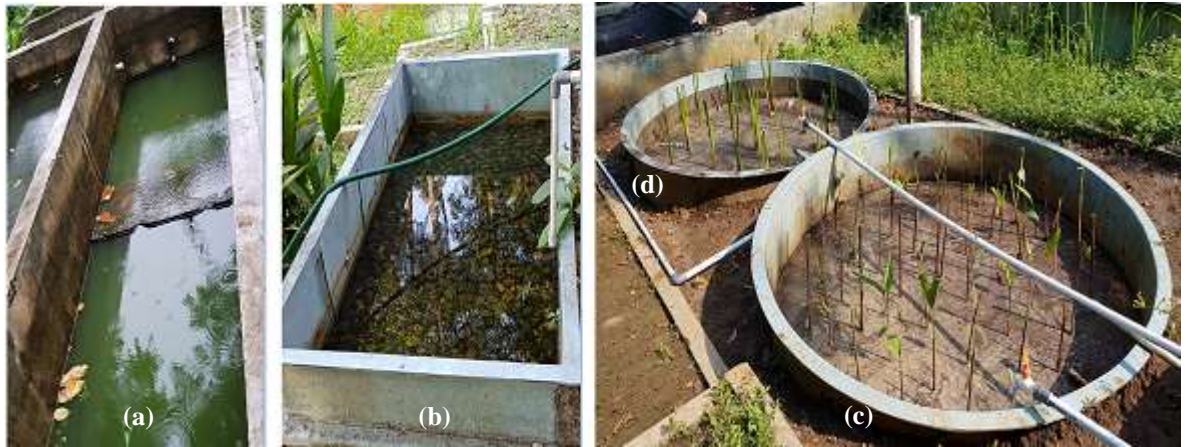
Tingginya potensi ekonomi agroidustri dari sektor perikanan mendorong peningkatan kegiatan budidaya ikan perairan tawar. Pusat Penelitian Limnologi – LIPI mengembangkan teknik budidaya terpadu berbasis *Intergrated Multi Trophic Aquaculture* (IMTA) berdasarkan konsep konservasi lingkungan yang memungkinkan peningkatan produktivitas dan nilai ekonomi budidaya ikan dengan tetap mempertahankan kualitas perairan. Teknologi tersebut menggabungkan komoditas ikan lele dan tumbuhan *Lemna perpusilla* Torr dalam satu sistem budidaya. Tumbuhan air *Lemna perpusilla* Torr selain berfungsi sebagai sumber pakan ikan yang mengandung protein tinggi (Landesman, 2005), juga sebagai fitoremediator yang memanfaatkan nutrisi air untuk pertumbuhannya. *Lemna perpusilla* Torr mampu menggantikan pakan buatan sebanyak 25% untuk menghasilkan bobot ikan yang signifikan (Ilyas *et al.*, 2014). Ikan memanfaatkan 20 – 30% nutrisi pakan dan sisanya 70 – 80% dikeluarkan dari tubuh ikan (Gunadi & Hafsaridewi, 2008). Peran *Lemna perpusilla* Torr sebagai pakan alami belum dapat menggantikan seluruh kebutuhan pakan pelet, menyebabkan kualitas air budidaya ikan menggunakan teknologi IMTA ini masih menghasilkan limbah cair dengan konsentrasi nitrogen, fosfor, senyawa organik dan *total suspended solid* (TSS) yang tinggi. Pencemaran nutrisi yang mengacu pada kontaminasi akibat input nutrisi yang ekssesif, menyebabkan berbagai permasalahan lingkungan diantaranya eutrofikasi pada air permukaan, ledakan toksik alga dan hipoksia (EPA, 2004). Pada kolam budidaya berbasis IMTA terjadi ledakan populasi mikroalga dari kelompok Cyanobacteria seperti *Microcystis aeruginosa* dan *Oscillatoria* sp. Teknologi IMTA belum mencapai kesetimbangan dalam menghasilkan produk budidaya dan menjaga kualitas air, sehingga masih dibutuhkan teknologi alternatif untuk mengolah air buangan limbah budidaya tersebut.

Construced treatment wetlands (CTWs) adalah sistem rekayasa yang didisain dan dibangun untuk melaksanakan fungsi-fungsi alami dari vegetasi lahan basah, tanah dan populasi mikroba dalam mengolah kontaminan pada air permukaan, air tanah atau limbah cair (Kadlec & Wallace, 2009). CTWs merupakan salah satu teknologi alternatif yang dapat diaplikasikan dengan mudah dan rendah biaya operasional sebagai kombinasi pengolahan biofilter dan fitoteknologi.

Teknologi ini dapat digunakan untuk mengolah berbagai tipe limbah cair dan memegang peranan penting dalam berbagai konsep sanitasi ekologis. CTWs banyak digunakan untuk mengolah limbah *greywater*, domestik dan perkotaan di negara-negara berkembang. Proses pengolahan dengan CTWs didasari oleh sejumlah proses biologis dan fisika, seperti adsorpsi, presipitasi, filtrasi, nitrifikasi, dekomposisi dan sebagainya. CTWs biasanya dijadikan pengolahan sekunder, dengan menambahkan *pre-treatment* sebagai upaya untuk mengurangi *clogging*. Limbah cair kegiatan budidaya dengan teknologi IMTA diolah menggunakan CTWs tipe aliran permukaan dengan dua jenis tumbuhan uji *Heliconia* sp dan *Cyperus* sp. Penelitian ini bertujuan untuk menguji kemampuan dan efisiensi penyisihan sistem CTWs dalam mengolah limbah cair budidaya perikanan berbasis IMTA.

Metodologi

Penelitian dilakukan di area instalasi sistem CTWs yang berada di Pusat Penelitian Limnologi – LIPI, Cibinong. Perlakuan terdiri atas sebuah kolam penampungan dan pengenceran limbah dengan kapasitas 4,00 m³, satu kolam *trickling filter* yang berdimensi 2,00 x 1,00 x 1,00 yang diisi dengan batu koral berdiameter 5 cm sebanyak 1,00 m³, dua buah kolam CTW dengan tipe aliran permukaan (*surface flow system*, SFS) yang berdiameter 2,00 m dan kedalaman 1,00 m. Kedua kolam tersebut diisi dengan kerikil, pasir dan tanah dengan masing-masing volume 1,884 m³, 1,256 m³ dan 0,314 m³. Waktu tinggal limbah dalam sistem pengolahan berkisar antara 4 – 6 hari. CTWs ditanami dengan *Heliconia* sp dan *Cyperus* sp, masing-masing dipotong pada ketinggian 40 cm dan 55 cm dan diaklimatisasi selama 2 minggu (Gambar 1). Air limbah diencerkan sebesar 30 – 50% di kolam penampungan sebelum dialirkan pada sistem CTWs.



Gambar 1. Kolam penampungan (a), *trickling filter* (b) dan CTWs – SFS dengan *Heliconia* sp (c) dan *Cyperus* sp (d)

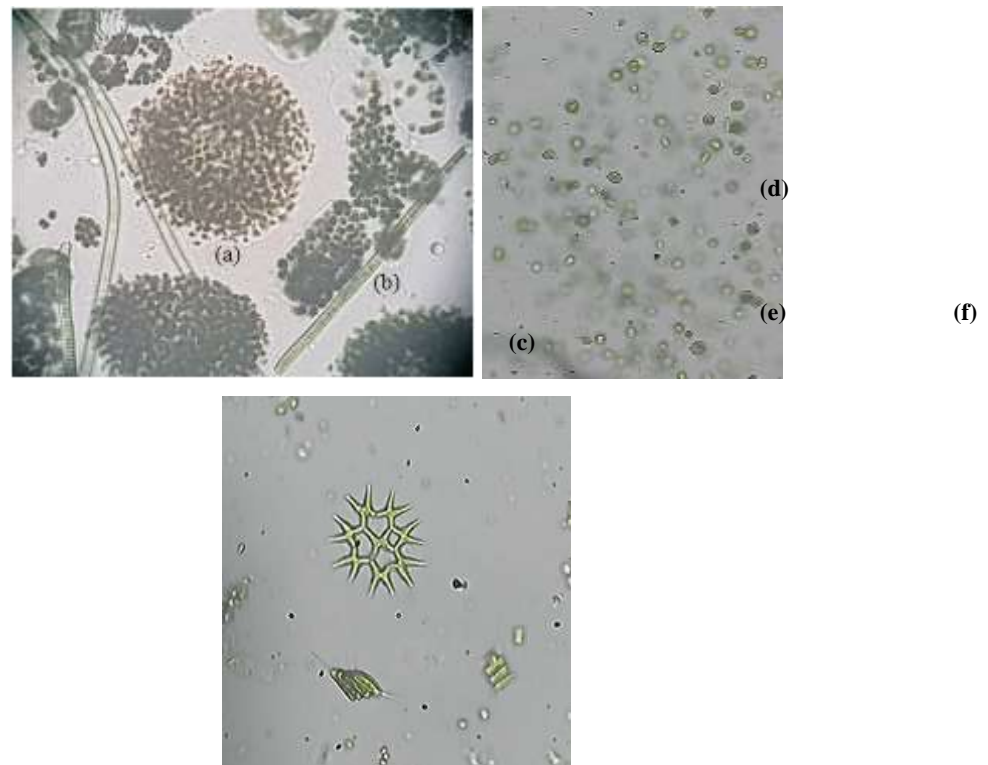
Pengambilan sampel dilakukan setiap minggu meliputi pengukuran kualitas air menggunakan *water quality checker* (WQC) tipe Horiba U-10 dan YSI-Pro, serta pengambilan sampel air pada kolam penampungan, *outlet* kolam *trickling filter*, *outlet* kolam CTW *Heliconia* sp dan *outlet* kolam CTW *Cyperus* sp. Parameter kualitas air yang diukur terdiri atas pH, oksigen terlarut (DO), turbiditas, suhu, TDS dan konduktivitas. Parameter kimia yang dianalisis berupa fosfat, total nitrogen, total fosfor dan *total suspended solid* (TSS).

Hasil dan Pembahasan

Karakteristik Limbah

Air limbah kegiatan budidaya ikan berbasis IMTA (*Integrated Multi Trophic Aquaculture*) berwarna hijau kebiruan yang merupakan representasi populasi mikroalga Cyanobacteria. Kolam budidaya lele berbasis IMTA ini didominasi oleh kelompok Cyanobacteria dari jenis *Microcystis aeruginosa* dan *Oscillatoria* sp (Gambar 2). Ledakan sejumlah besar fitoplankton merupakan respon terhadap peningkatan kandungan nutrisi pada badan air. Penambahan fosfor meningkatkan pertumbuhan alga dan tidak semua fosfat dapat dimanfaatkan oleh alga (Hochanadel, 2010). Kematian alga menyebabkannya tersimpan pada bagian dasar badan air dimana mereka akan mengalami dekomposisi dan nutrisi yang terkandung pada senyawa organik akan diubah oleh bakteri menjadi senyawa anorganik. Proses dekomposisi membutuhkan oksigen sehingga terjadi hipoksia

dan menurunnya kandungan oksigen terlarut yang dapat menyebabkan kematian ikan dan organisme lainnya.



Gambar 2. Cyanobacteria (a) *Microcystis aeruginosa*, (b) *Oscillatoria sp* dan (c) *Chroococcus sp* dan Chlorophyta *Pediastrum duplex* (d), *Scenedesmus sp* (e)(f)

Karakteristik air limbah budidaya perikanan berbasis IMTA dapat dilihat pada Tabel 1. Kandungan total nitrogen dan total fosfor pada air limbah tergolong tinggi hingga mencapai 47,7 mg/L dan 6,06 mg/L. Beberapa parameter lainnya melebihi baku mutu diantaranya kandungan oksigen terlarut kurang dari 4,00 mg/L, pH kurang dari 6,8 dan konsentrasi fosfat melebihi 0,20 mg/L. Perairan yang baik untuk menunjang kegiatan perikanan dengan kisaran oksigen terlarut ≥ 5 mg/L, pH 6,8 – 8,5, fosfat ≤ 1 mg/L dan nitrat ≤ 5 mg/L (PP No. 82 Tahun 2001 untuk kegiatan perikanan air tawar (kelas II)).

Tabel 1. Karakteristik air limbah budidaya berbasis IMTA

No.	Parameter	Satuan	Konsentrasi
1.	COD	mg/L	32,00
2.	Total nitrogen (TN)	mg/L	47,70
3.	Total fosfor (TP)	mg/L	6,06

4.	Fosfat (PO_4^{3-})	mg/L	2,08
5.	TSS	mg/L	112,00
6.	pH	-	6,20
7.	Oksigen terlarut (DO)	mg/L	3,50
8.	Turbiditas	NTU	443,40
9.	Konduktivitas	mS/cm	0,268
7.	Kelimpahan Plankton	Ind./L	49.050

Sumber: Data primer, 2019

Parameter fisika dan kimia sistem pengolahan dengan CTWs dapat dilihat pada Tabel 2. Nilai pH pada sistem pengolahan ini berkisar antara 7,1 – 7,7 yang merupakan kisaran pH normal untuk pertumbuhan dan metabolisme tanaman. Konsentrasi oksigen terlarut (DO) mengalami peningkatan pada kolam *trickling filter* (TF) dan CTWs, serta mengalami penurunan turbiditas dibandingkan pada kolam penampungan limbah. Pada kolam TF, air limbah yang mengalir pada lapisan batuan menyebabkan tumbuhnya lapisan mikroba (biofilm) yang menutupi permukaan batuan. Biofilm ini akan menguraikan senyawa-senyawa polutan. Proses nitrifikasi dan denitrifikasi merupakan dua proses yang dapat menurunkan konsentrasi nitrogen secara signifikan. TF didisain sebagai reaktor aerobik yang mampu menurunkan nitrogen amonia. Efisiensi proses nitrifikasi dipengaruhi oleh senyawa organik yang terdapat pada air limbah. Proses nitrifikasi sangat dipengaruhi oleh suhu dan pH, pada kisaran suhu 25,3 – 30,7°C dan pH cenderung netral (7,1 – 7,7) laju nitrifikasi berlangsung optimal. Suhu sangat mempengaruhi pertumbuhan mikroorganisme serta kecepatan reaksi kimia dan biokimia dalam proses-proses biologis (Romadhony & Sutrisno, 2010). Stabilitas performa terbaik dengan menjaga pH antara 6,5 – 8,0, sedangkan pada pH asam, laju nitrifikasi akan menurun secara signifikan. Ukuran media filter dengan luas permukaan semakin besar dapat meningkatkan kemampuan TF melangsungkan proses nitrifikasi (EPA, 2000).

Tabel 2. Parameter fisika dan kimia air pada sistem pengolahan limbah budidaya

IMTA

Kolam	pH	DO (mg/L)	Turb. (NTU)	Suhu (°C)	TDS (g/L)	Cond. (mV)
Penampungan	7,1 –		51,9 –	25,3 –	0,166 –	0,262 –
n	7,3	6,6 – 9,5	109,8	25,9	0,190	0,290
	7,1 –		21,8 –	25,3 –	0,056 –	0,062 –
TF	7,5	7,2 – 7,8	23,4	28,2	0,168	0,278
CTW	7,2 –		21,7 –	25,5 –	0,163 –	0,100 –
<i>Heliconia</i>	7,5	8,2 – 9,8	27,3	30,7	0,169	0,240
CTW	7,2 –	9,1 –	33,6 –	25,6 –	0,080 –	0,090 –
<i>Cyperus</i>	7,7	10,2	86,5	29,7	0,156	0,240

TDS berkisar antara 0,056 – 0,190 g/L dengan trend penurunan konsentrasi pada kolam TF dan mengalami peningkatan kembali pada kolam CTWs. TDS menunjukkan jumlah kation dan anion dalam air yang berasal dari berbagai sumber, apabila berada pada konsentrasi tinggi menyebabkan terjadinya pencemaran dan mengurangi kemampuan badan air untuk menjaga ekosistem air (Ilyas *et al.*, 2013). Kenaikan TDS menunjukkan bahwa bahan organik yang berukuran kecil belum terdegradasi secara sempurna dan adanya peningkatan biomassa mikroorganisme yang berukuran lebih kecil. Penurunan nilai TDS pada biofiltrasi sistem tanaman disebabkan bahan organik yang terdapat pada sampel air limbah menurun akibat proses penyerapan unsur hara oleh akar tanaman.

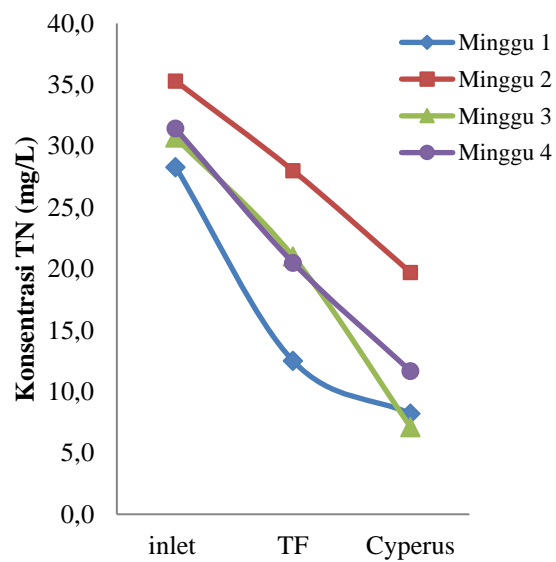
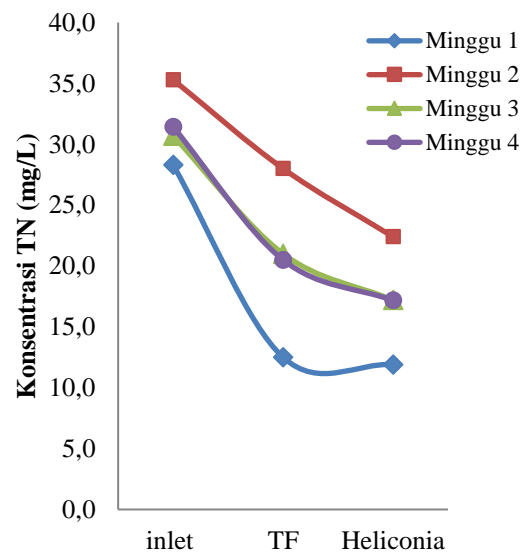
Turbiditas pada sistem CTWs masih berada di atas baku mutu yaitu sebesar 25 NTU, tingginya turbiditas pada *outlet* CTWs karena adanya alga filamen yang tumbuh pada permukaan air. Hal ini dapat diatasi dengan menambahkan filtrasi pada *outlet* sistem CTWs. Turbiditas disebabkan adanya bahan organik dan anorganik yang tersuspensi dan terlarut maupun plankton dan mikroorganisme lain.

Efisiensi penyisihan pada kolam TF untuk total fosfor, total nitrogen dan fosfat berturut-turut sebesar 22,1%, 36,04% dan 61,16% (Tabel 3). Pada CTWs penurunan konsentrasi total fosfor pada kedua kolam relatif tidak ada perbedaan, sedangkan penurunan konsentrasi total nitrogen dan fosfat pada CTW dengan tanaman *Cyperus* sp lebih tinggi dibandingkan CTW dengan tanaman *Heliconia* sp.

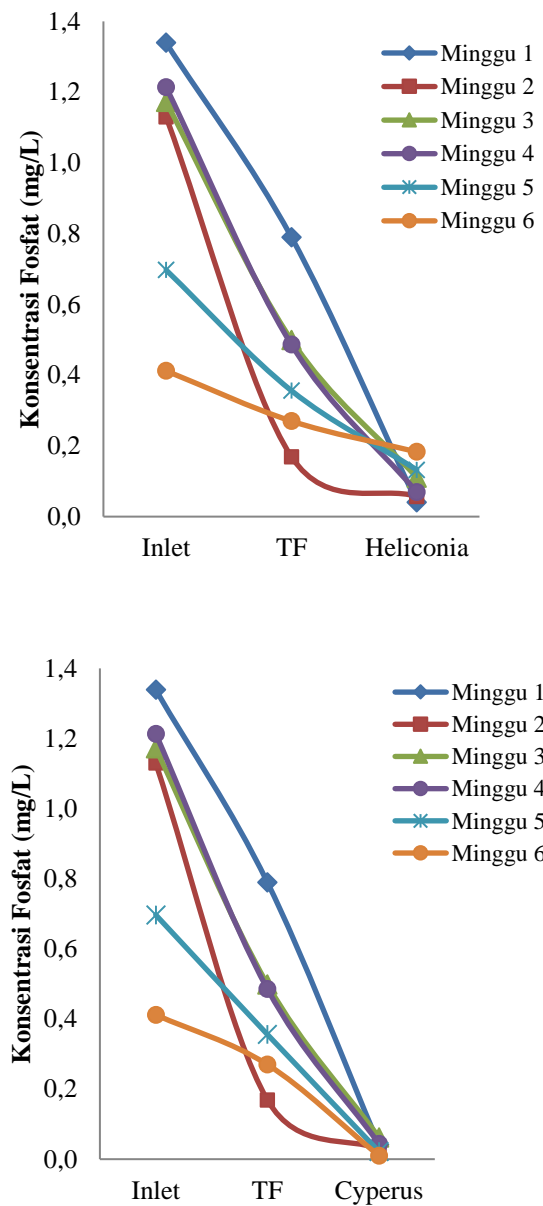
Tabel 3. Efisiensi penyisihan (%) *trickling filter*, CTWs – SFS *Heliconia* sp dan *Cyperus* sp

Efisiensi Penyisihan	TF (%)	<i>Heliconia</i> sp (%)	<i>Cyperus</i> sp (%)
Total Fosfor	11,50 – 36,32	49,17 – 68,55	48,65 – 69,43
	22,1	60,57	60,37
Total Nitrogen	20,68 – 55,83	36,54 – 57,95	44,19 – 76,87
	36,04	46,16	64,03
Fosfat	41,01 – 85,02	90,58 – 96,98	94,71 – 97,17
	61,16	94,18	96,37
TSS	4,50 – 6,00	42,86 – 65,66	10,53 – 83,83
	78,13	42,50	50,54

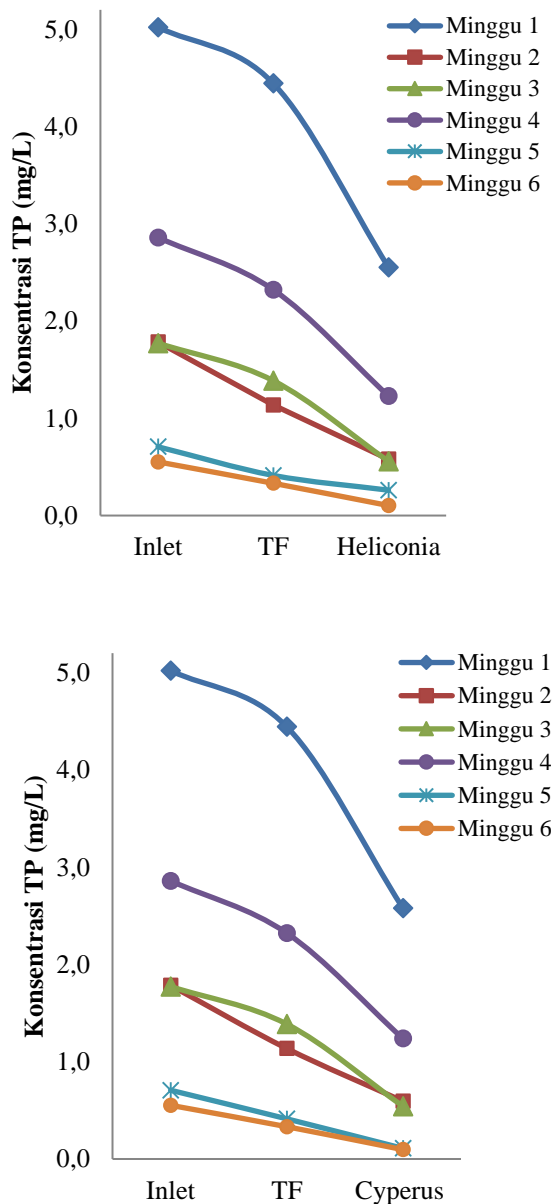
Penurunan konsentrasi total fosfor, fosfat dan total nitrogen rata-rata pada CTW dengan tanaman *Heliconia* sp berturut-turut sebesar 60,57%, 46,16% dan 94,18%. Pada CTW dengan tanaman *Cyperus* sp penurunan konsentrasi total fosfor, fosfat dan total nitrogen rata-rata sebesar 60,37%, 64,03% dan 96,37%. Efisiensi penurunan nutrisi pada CTW dengan tanaman *Cyperus* sp lebih tinggi dibandingkan tanaman *Heliconia* sp. Jenis tanaman *Cyperus* sp telah diketahui memiliki kemampuan kapasitas yang tinggi dalam mengeliminasi fosfor dan nitrogen (Ebrahimi *et al.*, 2013).



Gambar 3. Penurunan konsentrasi total nitrogen pada TF, CTW – SFS *Heliconia* sp dan *Cyperus* sp



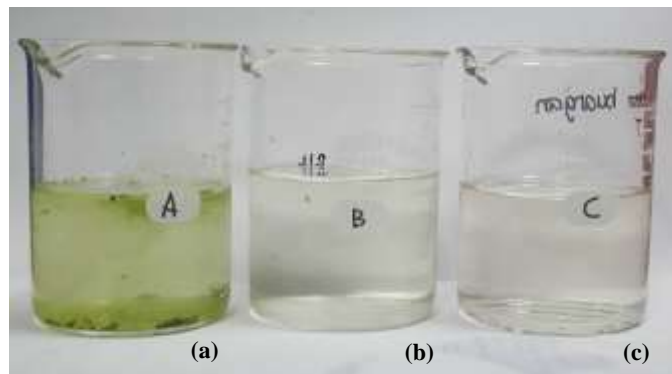
Gambar 4. Penurunan konsentrasi fosfat pada TF, CTWs – SFS *Heliconia* sp dan *Cyperus* sp



Gambar 5. Penurunan konsentrasi total fosfor pada TF, CTW – SFS *Heliconia* sp dan *Cyperus* sp

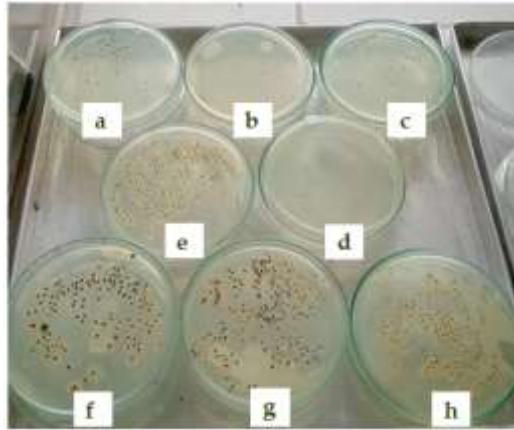
Tingginya konsentrasi TSS pada limbah budidaya berbasis IMTA ini berasal dari sisa pakan dan feses ikan yang terakumulasi sehingga meningkatkan kekeruhan yang menyebabkan penetrasi cahaya berkurang dan mempengaruhi regenerasi oksigen untuk proses fotosintesis. TSS mengalami penurunan pada kolam TF hingga mencapai 78,13% namun mengalami peningkatan kembali pada kolam CTWs baik pada kolam *Heliconia* sp maupun *Cyperus* sp. Peningkatan ini

disebabkan tumbuhnya beberapa alga filamen pada lapisan air yang terbawa pada *outlet*. Tumbuhnya sejumlah biomassa perifiton merupakan respon terhadap tingginya konsentrasi nutrisi yang masuk ke sistem pengolahan air limbah tersebut dan keberadaannya turut membantu proses penyerapan nutrisi air menjadi biomassa. CTWs dapat menyisihkan TSS, senyawa organik dan nutrisi hingga > 80%. Aplikasi CTWs pada daerah tropis memiliki keunggulan yang sangat dipengaruhi temperatur tinggi dan cahaya matahari sepanjang tahun serta meningkatkan produktivitas tanaman sehingga lebih efisien menyisihkan polutan (Zhang *et al.*, 2012).



Gambar 6. Air limbah IMTA pada *inlet* (a), *outlet trickling filter* (b) dan *outlet* CTWs (c)

Kemampuan penyisihan nutrisi yang lebih tinggi pada tanaman *Cyperus* sp ini dipengaruhi sistem perakaran pada tanaman *Cyperus* sp yang lebih lebat dibandingkan dengan *Heliconia* sp. Di daerah rhizosfer yang bersifat aerob memungkinkan aktivitas bakteri yang berperan dalam perombakan bahan pencemar. Mikroorganisme yang diharapkan dapat berkembang adalah bakteri heterotrof aerobik. Peningkatan populasi bakteri heterotrof ini disebabkan kemampuannya dalam memanfaatkan senyawa organik dan mengubah kandungan nitrogen yang terdapat pada air limbah tersebut menjadi biomassa mikroba (Sari & Effendi, 2014). Berdasarkan uji bakteri heterotrof pada sistem perakaran, jumlah bakteri yang terdapat pada *Cyperus* sp lebih tinggi dibandingkan *Heliconia* sp (Gambar 7).



Gambar 7. Bakteri heterotrof pada akar (a)(c) *Heliconia* sp pengenceran 10^3 x dan (b)(d) pengenceran 10^4 x , (e)(g) *Cyperus* sp pengenceran 10^3 x dan (f)(h) pengenceran 10^4 x

Secara umum kombinasi sistem pengolahan air limbah IMTA dengan TF dan CTWs efektif menurunkan polutan nutrien. Efektivitas penyisihan dapat ditingkatkan dengan memperpanjang waktu tinggal air limbah pada sistem pengolahan hingga lebih dari enam hari, atau dengan mengencerkan air limbah hingga di atas 50%.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengamatan selama 6 minggu, kombinasi sistem TF dan CTWs mampu menurunkan total nitrogen hingga mencapai 76,87%, dengan beban pencemar yang masuk ke sistem pengolahan berkisar antara 28,3 – 35,3 mg–TN/L. Total fosfor dan fosfat mengalami penurunan konsentrasi hingga 60,37% dan 97,37%. TSS mengalami penurunan pada kolam *Heliconia* sp dan *Cyperus* sp berturut-turut hingga 66% dan 84%. Jumlah bakteri heterotrof pada akar *Cyperus* sp lebih tinggi dibandingkan pada akar *Heliconia* sp.

Referensi

- Ebrahimi, A., Taheri, E., Ehrampousj, M. H., Nasiri, S. 2013. Efficiency of constructed wetland vegetated with *Cyperus alternifolius* applied for municipal wastewater treatment. *J. Env. & Public Health* Vol. 2013: 1 – 5.
- EPA. 2000. Wastewater technology fact sheet trickling filter nitrification. Washington DC: EPA 832-F-00-015 September 2000.

- EPA. 2004. Reactive nitrogen in the United States: An analysis of inputs, flows, consequences, and management options; a report of the Science Advisory Board EPASAB-11-013
- Hochanadel, D. 2010. Limited amount of total phosphorus actually feeds alga, study finds. *Lake Scientist*.
- Kadlec, R. H. & Wallace, S. D. 2009. *Treatment wetlands*. Second ed. United States of America: CRC Press.
- Gunadi, B. & Hafsaridewi, R. 2008. Pengendalian limbah amonia budidaya ikan lele dengan sistem heterotrofik menuju akuakultur tanpa limbah. *Pusat Penelitian dan Pengembangan Perikanan Budidaya* 639(805): 437 – 448.
- Ilyas, A. P., Nirmala, K., Harris, E., Widiyanti, T. 2014. Pemanfaatan *Lemna perpusilla* sebagai pakan kombinasi untuk ikan nila (*Oreochromis niloticus*) pada sistem resirkulasi. *J. Limnotek* 21(2): 1993 – 2001.
- Ilyas, N. I, Nugraha, W. D. & Sumiyatu, S. 2013. Penurunan kadar TDS pada limbah tahu menggunakan teknologi biofilm menggunakan media biofilter kerikil hasil letusan Gunung Merapi dalam bentuk random. *J. Teknik Lingkungan* 2(3): 1 – 10.
- Landesman, L., Parker, Fedler, Konikoff. 2005. Modeling duckweed growth in wastewater treatment systems. *Livestock Research for Rural Development*.
- Pemerintah Republik Indonesia. 2001. Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 82 Tahun 2001 tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air. Jakarta.
- Romadhorny, A & J. Sutrisno. 2011. Kinerja *constructed wetland* dalam menurunkan kandungan phospat (PO_4) dan ammonia (NH_3) pada limbah rumah sakit. *J. Teknik Lingkungan* 11(2): 22 – 27.
- Sari, E. P. & Effendi, A. J. 2014. Dinamika populasi bakteri heterotrof dan autotrof pada pengolahan *sludge produced water* hasil eksplorasi minyak dan gas bumi dengan metode *aerated static pile* dan degradasi anaerobik. *J. Teknik Lingkungan* 20(1): 68 – 77.
- Zhang, D. Q., S.K. Tan, R. M. Gersberg, Y.F. Liu, J. F. Zhu, S. Sadreddin. 2012. Nutrient removal in tropical subsurface flow constructed wetlands under batch and continuous flow conditions. *J. Environ. Manage.* 96: 1 – 6.