

Penurunan Kandungan Hidrokarbon Menggunakan *Constructed Wetland Reactor* Dalam Mengolah Limbah Minyak

Removal of Hydrocarbon Compounds Using Constructed Wetland Reactor to Treat Oily Wastewater

Joni Aldila Fajri^{1*}, Dewi Wulandari¹, Awaluddin Nurmiyanto¹, Aster Rahayu²

¹Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Indonesia.

²Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Ahmad Dahlan, Indonesia.

*email: joni.af@uii.ac.id

Disubmit: 22 Desember 2021 Direvisi: 29 Desember 2021 Diterima: 31 Desember 2021

ABSTRAK

Limbah minyak dari kegiatan perbengkelan otomotif umumnya dibuang langsung ke drainase sebelum masuk ke dalam badan air terdekat. Limbah minyak mengandung senyawa aromatik, hidrokarbon, logam dan lainnya yang sangat berpotensi merusak lingkungan. *Low cost wastewater treatment* seperti *wetland* memiliki efektifitas yang cukup baik untuk mengolah air limbah domestik dan air limbah spesifik. Oleh karena itu, tujuan penelitian ini adalah mengevaluasi kinerja reaktor kontinu *wetland* kombinasi dengan indigen bakteri dalam mereduksi zat pencemar limbah minyak. Konsorsium indigen bakteri ditambahkan ke dalam reaktor *wetland* (105 cm x 30 cm x 30 cm) yang terdiri dari kompartement *Vertical floating wetland* dan *constructed wetland* dan dioperasikan kontinu selama 30 hari dengan waktu tinggal total 15 hari. Hasilnya menunjukkan bahwa reaktor ini mampu menurunkan konsentrasi minyak-lemak 73-98%, Total Petroleum Hidrokarbon 77-99%, kandungan minyak 67-94%, dan juga minyak dan lemak 49 – 98%. Sehingga dapat disimpulkan, *reactor continuous vertical flow wetlands* kombinasi dengan indigen bakteri dan tanaman *Vetiveria z* mampu menurunkan kadar minyak-lemak, dan TPH.

Kata kunci: *Constructed wetland*, *Floating wetland*, Indogenik bakteri, *Vetiveria zizanioides*, Minyak lemak.

ABSTRACT

Oil and grease wastewater produced by the automotive workshop mainly introduces to the drainage without any prior treatment. Oily wastewater consists of aromatic compound, hydrocarbon, metal, and other contaminates that had major impairments into the environment. *Low cost wastewater treatment* e.g: *wetland* has satisfied performance to treat domestic wastewater and industrial wastewater. Therefore, the purpose of this study is to analyze the performance of continue *wetland* reactor combined with consortium indigenous bacteria to treat oily wastewater. Consortium indigenous bacteria were added to the three compartments in the reactor (105 cm x 30 cm x 30 cm); *vertical floating wetland* and *constructed wetland*, and it was operated for 30 days with the hydraulic residence time (HRT) for 15 days. As results, this reactor could reduce the concentration of oil-grease, total petroleum hydrocarbon (TPH), oil content, and oil grease (OG) at the level of 73-98%, 77-99%, and 49 – 98%, respectively. This result indicates that combination of consortium indigenous bacteria enhances the effectivity of *reactor continuous vertical flow wetlands* in degrading the oil-grease contaminants.

Keywords: *Constructed wetland*, *Floating wetland*, *Indigenous bacteria*, *Vetiveria zizanioides*, Oil-grease.

PENDAHULUAN

Minyak dan lemak merupakan senyawa trigliserida yang memiliki perbedaan fase pada suhu ruangan (Fessenden & Fessenden, 1986). Minyak pada suhu ruangan berwujud cair sedangkan lemak berwujud padatan. Secara umum, minyak dan lemak dapat diperoleh dari sumber hewani dan nabati, selain itu, dapat juga berasal dari proses fraksinasi minyak bumi yang menghasilkan bahak bakar, oli dan gemuk (lemak). Sehingga, kadar minyak, dan minyak dan lemak memiliki jumlah rantai karbon (hidrokarbon) yang berbeda tergantung dari sumber minyak dan lemak tersebut.

Kegiatan otomotif atau bengkel selalu berkaitan dengan penggunaan minyak dan oli baik dalam proses reparasi, pencucian hingga perawatan mesin. Kegiatan bengkel ini akan menghasilkan limbah minyak dan oli dengan jumlah yang cukup besar dan sangat penting untuk dilakukan kegiatan pengolahan limbah minyak dan oli. Keberadaan air limbah yang mengandung minyak apabila tidak disertai dengan pengelolaan yang tepat, dapat menimbulkan permasalahan jika terpapar ke lingkungan. Minyak yang meresap ke dalam tanah dapat menyebabkan tertutupnya suplai oksigen dan meracuni mikroorganisme tanah sehingga mengakibatkan kematian mikroorganisme tersebut. Tumpahan minyak di lingkungan juga dapat mencemari perairan hingga ke daerah sub-surface dan lapisan aquifer tanah (Yudono *et al.*, 2010).

Secara umum, pengolahan air limbah dapat dilakukan dengan berbagai cara tergantung karakteristiknya dan salah satu pengolahan air limbah yang murah dan efisien yaitu dengan metode fitoremediasi. Fitoremediasi merupakan proses pengurangan polutan dengan memanfaatkan tanaman sebagai media adsorpsi. Selain itu, proses bioremediasi yang memanfaatkan mikroorganisme untuk mendegradasi polutan juga dapat diterapkan. Kedua proses ini dapat dipadukan membentuk sistem *continuous wetlands*, yang terdiri dari *floating wetland* dan *constructed wetland*.

Metode *floating* dan *constructed wetland* dibedakan dari media yang digunakan. Pada metode *floating wetland* menggunakan media air dan tanaman, sedangkan metode *constructed wetland* menggunakan susunan batuan, kerikil pasir, lumpur dan tanaman. Tanaman yang digunakan pada kedua metode umumnya menggunakan rumput vetiver (*Vetiveria zizanioides*) serta pemanfaatan bakteri (Effendi *et al.*, 2017; Estuningsih *et al.*, 2013). Menurut Ristianingsih (2018), penggunaan tanaman vetiver (*Vetiveria zizanioides*) dan bakteri mampu menurunkan kadar minyak dan lemak sebesar 50-87% dan kandungan minyak sebesar 22-64%. Akan tetapi penggunaan tanaman vetiver (*Vetiveria zizanioides*) dan bakteri di dalam sistem batch kurang efisien dalam mereduksi konsentrasi minyak. Oleh karena itu, tujuan penelitian ini adalah menganalisis penurunan kandungan hidrokarbon dan minyak menggunakan metoda *constructed wetland*.

METODE PENELITIAN

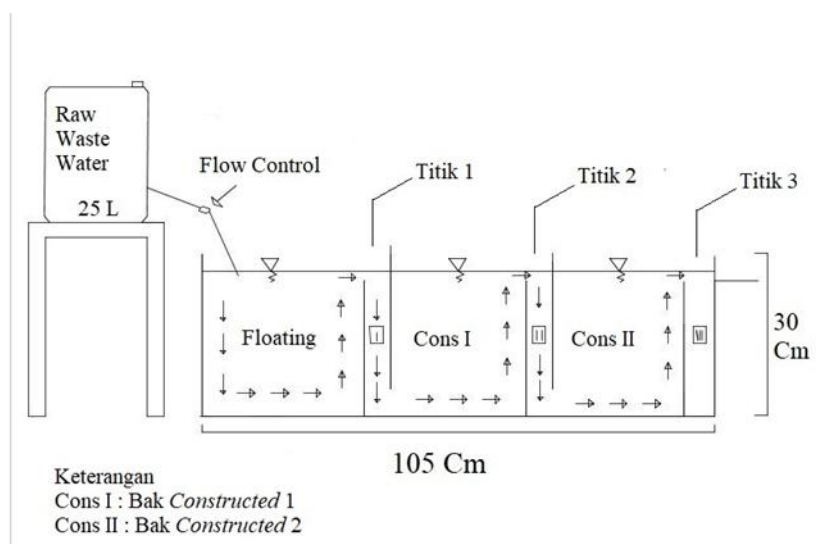
1) Sumber air limbah dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode yang sistematis untuk mengevaluasi kemampuan reaktor *Continuous Wetlands* dengan bantuan tanaman *Vetiveria zizanioides* dan indogenik bakteri dalam melakukan reduksi pada air limbah minyak. Air limbah yang digunakan adalah efluen hasil pengolahan minyak dari bengkel lokomotif di Yogyakarta yang menggunakan air dan minyak bumi (bahan

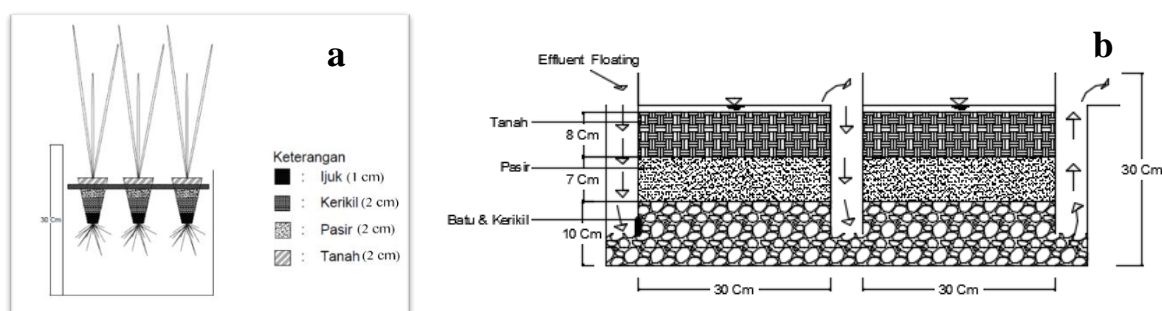
bakar) yang digunakan untuk mencuci mesin lokomotif Pengolahan limbah minyak disumber limbah dilakukan dengan cara pemisahan antara minyak dan air secara gravitasi, selanjutnya minyak yang terpisah digunakan kembali sedangkan air yang bercampur dengan minyak terlarut menjadi efluen yang digunakan untuk pencucian dan lainnya termasuk untuk penelitian ini. Sedangkan, kegiatan penelitian pengolahan limbah minyak dilakukan di laboratorium Bioteknologi Lingkungan, Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Islam Indonesia. Penelitian ini dilakukan pada bulan Januari hingga maret 2019.

(2) Reaktor Wetland

Reaktor Wetland yang digunakan berbahan kaca dengan dimensi ($P \times L \times H$) $105 \times 30 \times 30$ cm yang terdiri dari tiga kompartemen yaitu 1 kompartemen *floating wetland* dan 2 kompartemen *constructed wetland* dengan dimensi masing – masing $30 \times 30 \times 30$ cm (Gambar 1). Antar kompartemen tersedia penyekat aliran efluen kompartemen dengan lebar 10 cm dan digunakan untuk tempat sampling air limbah.



Gambar 1. Skema reaktor *floating* dan *constructed wetland*.



Gambar 2. Detail komposisi (a) *floating wetland* dan (b) *Constructed wetland*

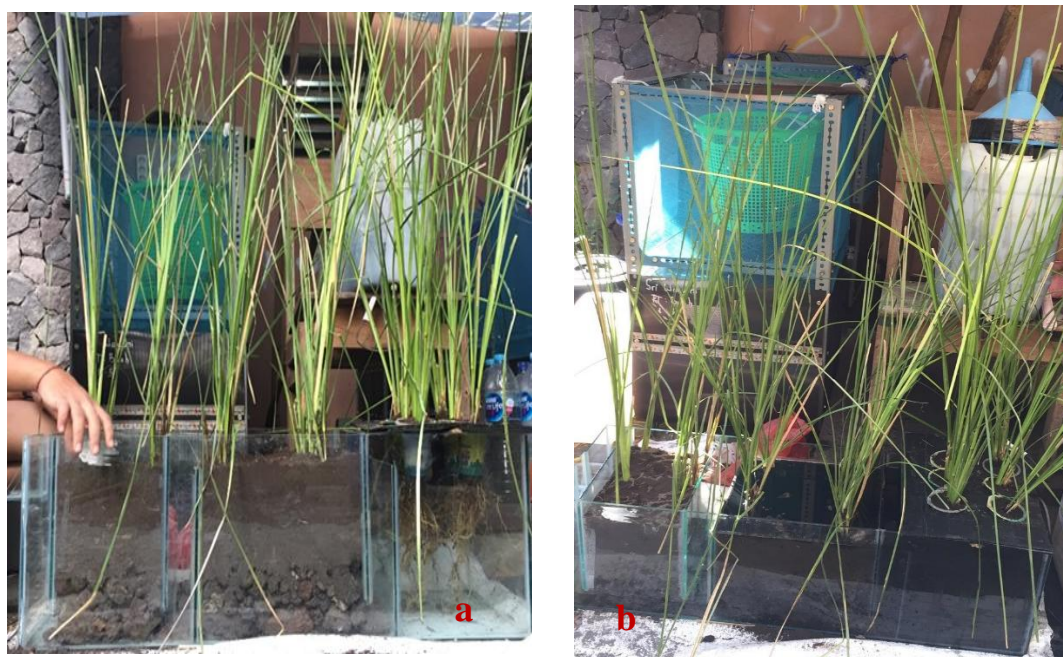
Detail komposisi per kompartemen adalah sebagai berikut:

a. *Floating Wetland*

Floating wetland terdiri dari dua bagian yaitu pot tanaman dan tanaman *Vetiveria zizanioides* yang disupport oleh *styrofoam* berbentuk pipih setebal 7 cm. Support ini memiliki 6 lubang (diameter 7,5 cm) yang berguna untuk menempatkan pot yang berisi 2-3 rumpun tanaman *Vetiveria z.* yang diapungkan. Pot tanaman merupakan gelas plastik dengan diameter 4 cm dan volume 100 mL. Pot tanaman dilobangi bagian dasarnya untuk memberikan ruang bagi akar tanaman untuk tumbuh ke bawah dan bagian atas terdiri dari ijuk, kerikil, pasir dan tanah (2a). Akar pada tanaman membentang di bagian bawah dengan demikian tanaman tumbuh secara hidroponik.

b. *Constructed wetland* I dan II

Pada kompartemen ke dua dan tiga digunakan sebagai *Constructed Wetland* dengan komposisi terdiri dari batu kali-kerikil, pasir dan tanah dengan ketinggian masing-masing 10 cm, 7 cm, dan 8 cm secara berurutan. Jumlah tanaman *Vetiveria z.* yang ditanaman pada kompartement I dan II berisi 9 dan 6 tanaman dengan masing tanaman terdiri dari 2-3 rumpun.



Gambar 3. Kondisi reaktor *wetland* saat (a) aklimatisasi dan (b) pasca aklimatisasi/awal running reaktor.

(3) Aklimatisasi Tanaman *Vetiveria zizanioides*

Tanaman *Vetiveria z.* terlebih dahulu diaklimatisasi di dalam reaktor *wetland* sebelum digunakan dalam penelitian. Tanaman *Vetiveria z.* didapatkan dari tanaman hias di area Jawa Tengah dengan umur sekitar 3 bulan. Aklimatisasi dilakukan dengan memotong rumpun tanaman *Vetiveria z.* setinggi 30 cm dari pangkal akar, kemudian menambahkan air dari *tap water* dan memberikan pupuk ke dalam reaktor secara berkala. Proses ini dilakukan agar tanaman beradaptasi dengan kondisi lingkungan yang baru dan menumbuhkan akar tanaman. Aklimatisasi dilakukan selama 30 hari dengan ditandai bertambah panjang daun dan telah tumbuh akar tanaman yang baru. Untuk membantu pertumbuhan, selama aklimatisasi diberikan pupuk hidroponik AB Mix

(Merk Maestro) sekali dalam seminggu. Pupuk hidroponik AB Mix terdiri dari 2 bagian yaitu bagian A dan bagian B. Pupuk AB Mix digunakan dengan mencampurkannya ke dalam 40 L air bersih sebanyak 40 L dengan larutan A dan B masing-masing sebanyak 200 mL. Sehingga, rasio untuk Larutan A : Larutan B : Air yaitu 1 : 1 : 200.

(4) Isolasi bakteri Indogenik

Tahapan isolasi bakteri indogenik dilakukan dengan 3 gr tanah tercemar minyak di sekitar lokasi sumber air limbah dicampur aquades steril kemudian diaduk selama 15 menit dengan kecepatan 250 rpm. Supernatan dari proses ini digunakan untuk mengisolasi bakteri indogenik menggunakan media agar LB dengan campuran bahan bakar pertalite sebanyak 5% (semua bahan disterilkan) sebagai sumber karbon kemudian diinkubasi dengan temperatur 30 °C selama 24 jam. Bakteri yang tumbuh pada tahap isolasi kemudian dipilih 5 isolat secara random berdasarkan perbedaan morfologi dan dipindahkan ke 250 mL LB broth steril untuk dikultur diatas shaker 250 rpm pada suhu ruangan (27 °C) selama 24 jam. Selanjutnya, isolat yang telah dikultur siap dimasukan ke dalam reaktor wetland. Isolasi bakteri menggunakan control negatif yang hanya berisi agar tanpa ada campuran, dan pada proses isolasi bakteri tidak ada bakteri yang tumbuh di control negatif.

(5) Running reaktor dan sampling

Setelah proses aklimatisasi tanaman dan persiapan bakteri indogenik proses *running* reaktor *wetland* sudah bisa dilakukan. Reaktor *wetland* dijalankan dengan terlebih dahulu mengeluarkan air sisa aklimatisasi dengan cara mengisi air limbah minyak mulai dari kompartemen *floating wetland* hingga *constructed wetland* II. Reaktor *wetland* ini menggunakan sistem aliran *downflow* untuk setiap kompartemen dengan dengan waktu tinggal (Td) 5 hari atau 15 hari untuk keseluruhan proses reaktor. Tangki penampung air limbah berada 1 m di atas reaktor untuk membantu mengalirkan air limbah secara gravitasi dengan debit aliran di atur sebesar 4.5 L/hari. Reaktor *wetland* dijalankan selama 26 hari secara kontinu. Kegiatan sampling pengolahan limbah minyak dilakukan pada tiga titik area pelimpasan efluen kompartemen (Gambar 1.) pada kedalaman 15 cm dari permukaan air dengan jadwal sampling dilakukan pada hari ke 6, 11, 16, 21 dan 26. Sebanyak 300 mL sampel diambil dari masing – masing titik dan langsung diuji pada hari yang sama untuk parameter total petroleum hidrokarbon, kandungan minyak, dan minyak-lemak. Selama reaktor *wetland* beroperasi, efluen limbah minyak dari bengkel lokomotif diambil setiap 4-5 hari sebagai *input* reaktor *wetland*

(6) Paramater

Parameter yang dievaluasi pada penelitian ini adalah total petroleum hidrokarbon (TPH), kandungan minyak (OC), dan minyak dan lemak (OG). Parameter OC merupakan kandungan minyak bumi baik yang terlarut maupun tidak, sedangkan OG merupakan campuran kandungan minyak bumi dan lemak (oli dan gemuk) yang terlihat menggumpal atau tidak terpisahkan antar keduanya, tetapi terpisah dengan air. Pengujian parameter tersebut dilakukan sesuai dengan Standar Nasional Indonesia (SNI) seperti yang ditampilkan pada Tabel 1.

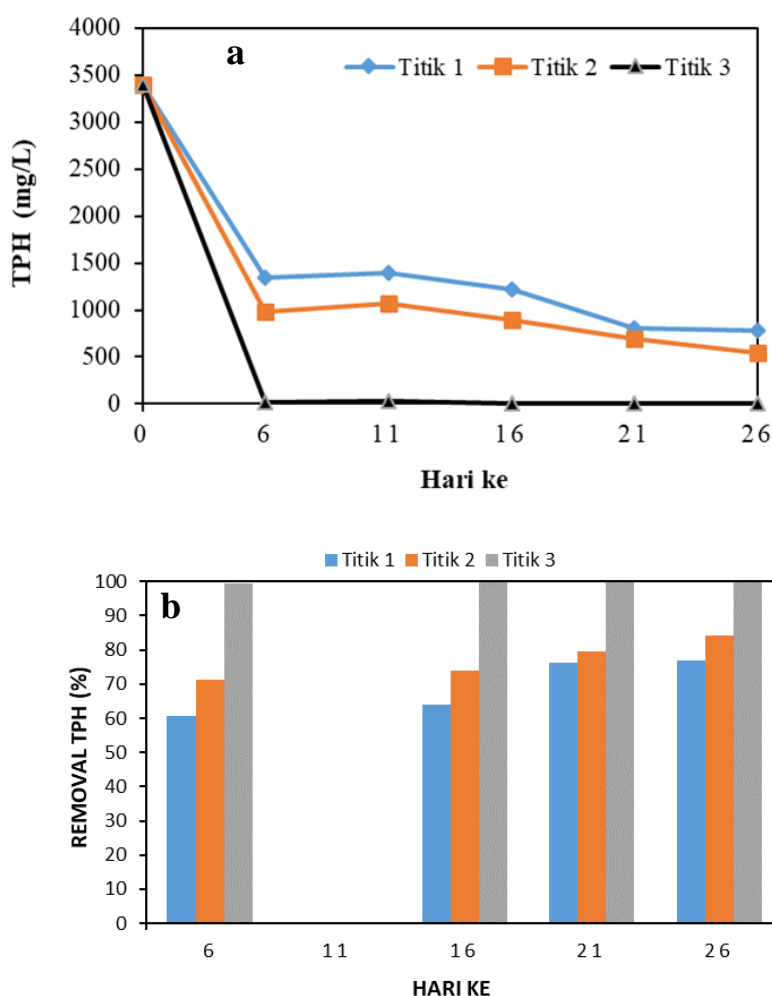
Tabel 1. Analisis parameter

Parameter	unit	Metode	SNI
TPH	mg/L	Gravimetri	6989.10.2011
Oil Content	mg/L	Gravimetri	6989.10.2011
OG	mg/L	Gravimetri	6989.10.2011

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Hasil Penelitian

a. TPH Removal



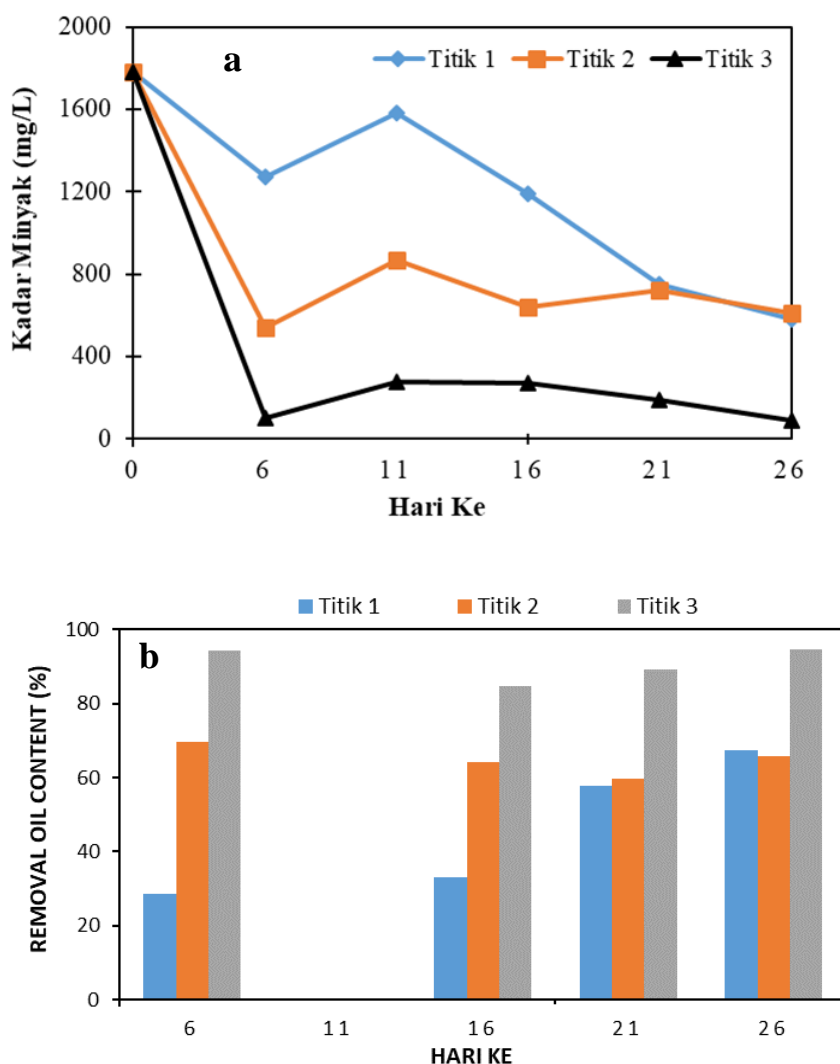
Gambar 4 (a) Konsentrasi TPH dan (b) persentase removal TPH

Penurunan konsentarsi TPH dimasing – masing titik menunjukkan penurunan yang cukup signifikan selama reaktor wetland beroperasi (Gambar 4). Konsentrasi TPH turun dari 3.400 mg/L menjadi 1.340, 980, dan 20 mg/L pada Titik 1, 2 dan 3 secara berurutan pada sampling ke 6. Sedangkan, pada akhir operasi reaktor wetland hari ke

26, konsentrasi TPH diketahui menurun untuk Titik 1, 2 dan 3 masing – masing 780, 540, dan 7 mg/L berurutan. Persentase penurunan kadar TPH pada kompartmen 1, 2 dan 3 pada hari ke 6 besar 60.6, 71.2, dan 99.4 % untuk masing-masing kompartemen. Persentase penurunan kadar TPH pada hari ke 26 terlihat semakin meningkat menjadi 77, 84, dan 99.7% untuk kompartmen 1, 2 dan 3.

b. Oil Content removal

Konsentrasi Oil Content (OC) mengalami fluktuasi dalam proses degradasi secara fitoremediasi seperti yang terlihat pada Gambar 5. Konsentrasi OC mengalami penurunan setiap minggunya mulai untuk setiap pengelohannya. Pada hari ke 6, konsentrasi OC turun dari 1800 mg/L menjadi 1270, 540 dan 100 mg/L untuk masing – masing Titik 1, 2, dan 3. Sedangkan pada hari ke 26. Penurunan konsentrasi OC semakin meningkat menjadi 580, 610 dan 93 mg/L untuk masing – masing Titik 1, 2, dan 3.

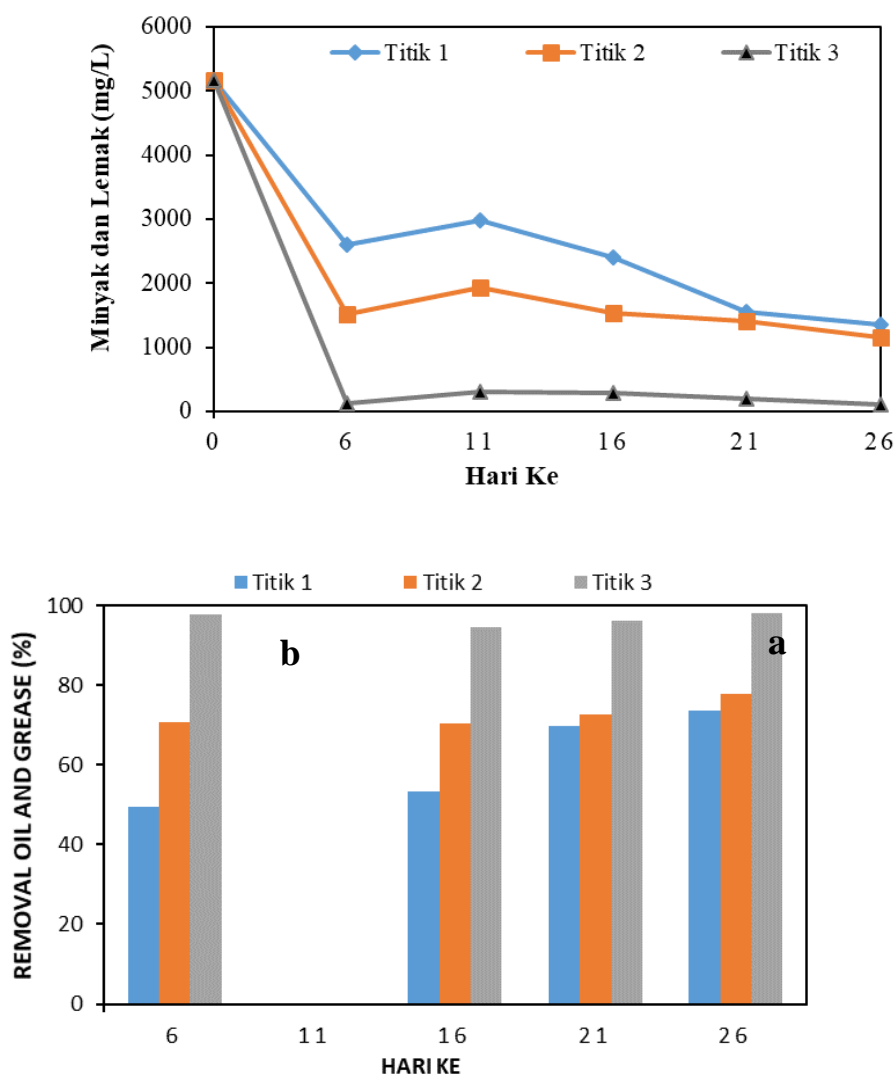


Gambar 5. (a) Fluktuasi konsentrasi OC dan (b) persentase removalnya.

Konsentrasi OC pada reaktor *wetland* menurun setiap minggu di masing-masing kompartemen.t (Gambar 5a). Pada minggu pertama, persentase removal OC pada kompartemen 1, 2, dan 3 sebesar 28.6, 70, dan 94.4%. Sedangkan pada minggu ke empat, removal OC pada kompartemen 1, 2, dan 3 meningkat menjadi 67.4, 65.7 dan 94.8%. Penurunan kadar OC seiring dengan penurunan kadar TPH pada proses reaktor *wetland*. Akan tetapi, konsentrasi OC pada akhir operasi masih berada jauh dari kadar maksimum yang ditetapkan oleh Peraturan Daerah Istimewa Yogyakarta yaitu sebesar 2 mg/L ([Perda DIY No.7/2010 Tentang BMAL](#)).

c. Oil and Grease Removal

Konsentrasi *Oil and Grease* (OG) merupakan komposisi yang paling dominan dalam penentuan kadar minyak. Sehingga perubahan kandungan OG akan mempengaruhi kandungan TPH dan OC begitu juga sebaliknya. Konsentrasi OG menunjukkan penurunan konsentrasi yang sama seperti kandungan



Gambar 6 (a) Konsentrasi Oil and Greasei dan (b) Removal Oil and Grease

TPH dan OC. Pada hari ke 6, konsentrasi OG menurun signifikan di masing – masing kompartemen yaitu dari 5.180 mg/L menjadi 2610, 1520, dan 120 mg/L untuk kompartemen 1, 2, dan 3. Sedangkan, pada hari ke 11 dan 16, terjadi fluktuasi kenaikan konsentrasi OG menjadi 2980, 1940, dan 310 mg/L untuk kompartemen. Kenaikan konsentrasi OG dipengaruhi oleh kadar hidrokarbon dan OG pada raw air limbah minyak yang diambil dari bengkel lokomotif setiap 4-5 hari selama reaktor wetland dijalankan dimana kadar TPH dan OG akan berbeda untuk setiap pengambilan air limbah minyak. Sehingga, perbedaan konsentrasi TPH dan OG pada setiap pengambilan air limbah minyak berpotensi menurunkan efisiensi pengolahan wetland karena memiliki beban OG yang berbeda.

Sedangkan pada pengujian OG pada hari ke 26 menunjukkan penurunan konsentrasi yaitu menjadi 1360, 1150 dan 100 mg/L untuk masing – masing kompartemen 1, 2 dan 3. Konsentrasi OG terendah terdapat di titik 3 (*constructed wetland II*) pada hari ke-26 yaitu 100 mg/l. Berdasarkan BMAL Perda DIY No. 7 Tahun 2010, konsentrasi maksimal minyak dan lemak yaitu 5 mg/l, sehingga konsentrasi oil and grease belum memenuhi baku mutu.

Persentase penurunan kadar OG menunjukkan peningkatan di setiap kompartemen (Gambar 6b). Pada hari ke 6, Persentase penurunan kadar OG pada hari ke 6 yaitu sebesar 49, 70, dan 97.7% untuk kompartemen 1, 2 dan 3. Penurunan kadar OG semakin meningkat pada di hari ke 26 untuk di kompartemen 1, 2, dan 3 yaitu 73.7, 77.8 dan 98% berurutan.

2. Pembahasan Hasil Penelitian

Penurunan konsentrasi TPH pada kompartemen *floating wetland* terjadi karena Di sekitar akar rumput vetiver terdapat bakteri yang dapat menguraikan minyak, bakteri tersebut menghasilkan enzim *alkane hydroxylase* yang memecah ikatan karbon (C) menjadi senyawa sederhana yang tidak berbahaya dan melarutkannya ke dalam air (Rehman et al., 2018). Tanaman *Vetiver* z memiliki kemampuan yang lebih baik dalam menyerap polutan dan tumbuh pada lingkungan tercemar minyak bumi dibandingkan dengan tanaman lain (Yani, 2012). Menurut Rehman et al. (2018), tanaman *Vetiveria zizanioides* yang diaklimatisasi selama 1 bulan bertujuan untuk membuat tanaman tumbuh dan memiliki akar yang lebih banyak. Dengan fungsi akar yang beragam seperti menghasilkan biomassa secara masif, kemampuan beradaptasi dan tumbuh di lingkungan yang ekstrim, membuat rumput vetiver sering digunakan untuk proses fitoremediasi (Danh et al., 2009). Lebih lanjut, hasil pengolahan air limbah menunjukkan tanaman vetiver mampu mereduksi konsentrasi TPH menjadi 215 µg/L di hari ke 28 dan menjadi 161 µg/L setelah 42 hari. TPH pada limbah sedimen diolah selama 75 hari yang mana menurunkan konsentrasinya dari 130 mg/kg menjadi 40 mg/kg (Phenrat & Teeratitayangkul 2017). Sedangkan, penelitian dengan menggunakan tanaman *Vetiveria zizanioides* tanpa penambahan bakteri, dapat mengurangi bahan pencemar pada air limbah. Tetapi, hasil yang didapat lebih kecil dari persentase penurunan dengan penambahan bakteri. Penambahan bakteri dapat membantu proses dekomposisi pada tanaman (Ristianingsih, 2018).

Sedangkan dalam kompartemen *constructed wetland* dapat terjadi selain faktor degradasi oleh akar, tetapi juga disebabkan oleh proses filtrasi oleh tanah dan pasir. Selain itu juga, konsorsium indogenik bakteri mengambil peranan mendegradasi senyawa hidrokarbon menjadi CO₂ dan H₂ yang dapat dimanfaatkan oleh tanaman dalam

proses metabolismenya. Tanaman vetiver dalam hal ini akan mengeluarkan eksudat akar yang bisa dimanfaatkan oleh bakteri untuk melakukan metabolisme yang hasil tersebut akan digunakan untuk meningkatkan aktifitasnya dalam mendegradasi hidrokarbon (Yani, 2012).

Wilson & Bradley (1996), melakukan penelitian tentang penggunaan bakteri *Pseudomonas* sp. untuk mendegradasi TPH dalam sistem reaktor batch yang berisi air limbah minyak dan bakteri. Penelitian tersebut menunjukkan keterbatasan gerak dari bakteri atau tanpa adanya aliran air limbah dapat meningkatkan kontak antara sel bakteri dengan unsur hidrokarbon dan produksi rhamnolipid (biosurfaktan yang dihasilkan bakteri). Rhamnolipid menyebabkan dispersi yang lebih besar dari n-alkana yang tidak larut dalam air dalam fase cair karena sifat amphipathiknya dan molekul yang terdiri dari gugus hidrofilik dan hidrofobik mengurangi ketegangan antar muka sistem air-minyak. Hal ini mengakibatkan hidrokarbon larut dengan air dan penyerapan hidrokarbon yang cepat ke dalam sel.

Hasil penelitian lainnya, pada minggu ke-1 sampai minggu ke-2 terjadi penurunan oil content dari 0,06 mg/L menjadi 0,03 mg/L (Munawaroh, 2106). hal ini dikarenakan mikroba yang ada di rhizosfer mengurai minyak dan diserap oleh tanaman vetiver sebagai nutrisi berkembang biak. Secara umum degradasi minyak tidak mungkin dilakukan secara langsung oleh tumbuhan, tetapi tumbuhan akan bekerja sama dengan mikroba (Frick *et al.*, 2014).

SIMPULAN

Kombinasi reaktor wetland (floating dan constructed wetland) dengan indogenik bakteri menunjukkan penurunan kadar TPH, Oil Content dan Oil and Grease yang cukup signifikan hingga menjadi 99% pada akhir pengolahan. Kandungan TPH, OC dan OG pada akhir pengolahan yaitu 7, 93, dan 100 mg/L. Tingginya penurunan hidrokarbon dan minyak lemak menggunakan reaktor wetland kombinasi dengan konsorsium bakteri indogenik dapat menjadi alternatif pengolahan air limbah minyak yang murah dan efisien.

SANWACANA

Ucapan terima kasih terutama ditunjukkan kepada PT. KAI Unit Pelaksana Teknis (UPT) Daerah Istimewa Yogyakarta yang berkenan mengizinkan menggunakan efluen IPAL sebagai sumber limbah dalam penelitian ini. Dan juga, kami ucapkan terima kasih kepada Bapak Luqman Hakim, ST., M.Sc dan Bapak Yebi Yuriandala, ST., MT. dalam memberikan bantuan suport akses ke PT KIA Yogyakarta.

DAFTAR PUSTAKA

- Danh, L. T., Troung, P., & Mammucari, R. (2009). Vetiver grass , *vetiveria zizanioides* : a choice plant for phytoremediation of heavy metals and organic wastes. *International Journal of Phytoremediation*, 11 (8), 664-691. <https://doi.org/10.1080/15226510902787302>
- Effendi, H., Munawaroh, A., & Puspa Ayu, I. (2017). Crude oil spilled water treatment with *Vetiveria zizanioides* in floating wetland. *Egyptian Journal of Aquatic Research*, 43(3), 185–193. <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2017.08.003>

- Estuningsih, S. P., Juswardi, Yudono, B., Yulianti, R. (2013). *Potensi Tanaman Rumput Sebagai Agen Fitoremediasi Tanah Terkontaminasi Limbah Minyak Bumi*. Prosiding Semirata FMIPA Universitas Lampung, 2013. Universitas Lampung. Bandr Lampung. 365–370.
- Fessenden, R. J., dan Fessenden, J.S. (1986). *Kimia Organik Edisi Ketiga Jilid 2* (Terjemahan). Penerbit Erlangga. Jakarta.
- Frick, C. M., Farrell, R. E., & Germida, J. . (2014). *Assessment of phytoremediation as an in-situ technique for cleaning oil- contaminated sites Assessment of Phytoremediation as an In-Situ Technique for Cleaning Oil-Contaminated Sites .University of Saskatchewan*.
- Munawaroh, A. (2106). *Fitoremediasi limbah minyak bumi dalam air menggunakan tanaman akar wangi (Vetiveria zizanioides) dengan sistem floating wetland*. Skripsi. Institut Pertanian Bogor.
- Peraturan Daerah (PERDA) Istimewa Yogyakarta Nomor 7 Tahun 2010 Tentang Baku Mutu Air Limbah
- Phenrat, T & Teeratitayangkul, P. (2017). Phytoremediation of Illegally Dumped Petroleum Hydrocarbon-contaminated wastewater Using Vetiver (Vetiveria zizanioides (L.) Nash). Thailand: Department of Civil Engineering, Naresuan University.
- Rehman, K., Imran, A., Amin, I., & Afzal, M. (2018). Inoculation with bacteria in floating treatment wetlands positively modulates the phytoremediation of oil field wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, 349, 242–251. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.02.013>
- Ristianingsih, R. (2018). *Pengolahan Air Limbah Pencucian PT. KAI Yogyakarta Menggunakan Floating Treatment Wetland Kombinasi dengan Tanaman Vetiver Zizanioides dan Bakteri*. Yogyakarta: Jurnal Teknik Lingkungan UII.
- Standar Nasional Indonesia No. 6989 (2011). *Standar Nasional Indonesia Air dan air limbah – Bagian 10: Cara uji minyak nabati dan minyak mineral secara gravimetri*.
- Wilson, N. G., & Bradley, G. (1996). *The effect of immobilization on rhamnolipid production by Pseudomonas fluorescens*. 525–530.
- Yani, I. E. (2012). *Uji kemampuan tanaman vetiver (Chrysopogon zizanioides (L.) Roberty) Sebagai Fitoremediator pada proses Bioremediasi Tanah Terkontaminasi PHC (Petroleum Hydrocarbon)*.
- Yudono, B., Said, M. S., Napoleon, A., & Utami, B. M. (2010). Kinetics of Petroleum-Contaminated Soil Biodegraded by An Indigenous Bacteria Bacillus megaterum. *HAYATI Journal of Bioscience*, 17(4), 155–160. <https://doi.org/10.4308/hjb.17.4.155>