

## EFISIENSI SISTEM LAHAN BASAH BUATAN ALIRAN PERMUKAAN DENGAN VARIASI DEBIT DALAM MENYISIHKAN MANGAN PADA AIR ASAM TAMBANG

Nopi Stiyati Prihatini<sup>1,2</sup>, Chairul Abdi<sup>2</sup>, Yudha Aje Pratama<sup>2</sup>, Ihsan Noor<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Pusat Studi Pasca Tambang LPPM Universitas Lambung Mangkurat

<sup>2</sup>Program Studi Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Lambung Mangkurat,  
Jl. A. Yani Km. 37, Banjarbaru, Kode Pos 70714, Indonesia

E-mail: [ns.prihatini@ulm.ac.id](mailto:ns.prihatini@ulm.ac.id)

### ABSTRAK

Terbentuknya air asam tambang (AAT) merupakan salah satu dampak dari adanya aktifitas pertambangan. Air asam tambang memiliki ciri pH asam berkisar antara 3-5, warna air kuning kemerahan, dengan konsentrasi besi (Fe) dan mangan (Mn) yang tinggi. Penyisihan Mn menjadi tantangan tersendiri karena mangan hanya dapat disisihkan jika konsentrasi Fe AAT kurang dari 5 mg/L. Teknologi yang kini dikembangkan untuk menyisihkan Mn air asam tambang adalah sistem lahan basah buatan (LBB). Kinerja LBB dipengaruhi oleh debit AAT. Untuk mengetahui efisiensi penyisihan mangan (Mn) dan nilai pH pada LBB, maka pada penelitian ini digunakan Lahan Basah Buatan Aliran Permukaan (LBB-AP) berdimensi 150cm x 50 cm x 75 cm beraliran kontinyu dengan variasi debit. Pada penelitian ini akan divariasi debit AAT yaitu D0 7,1 mL/menit; D1 8,8 mL/menit; D2 10,5 mL/menit, dan D3 12,2 mL/menit. Hasil penelitian menunjukkan peningkatan pH terbaik pada D0 7,1 mL/menit periode ke 4 dengan nilai pH 4,3. Kemampuan penyisihan Mn terbaik pada LBB D0 7,1 mL/menit periode ke 1 sebesar 3,3 mg/L dengan efisiensi sebesar 62%.

Kata Kunci : air asam tambang, lahan basah buatan aliran permukaan, mangan, variasi debit.

### ABSTRACT

The formation of acid mine drainage (AAT) is one of the impacts of mining activities. Acid mine water has a characteristic low water pH ranging from 3-5, the color of reddish-yellow water, and has high concentrations of iron (Fe) and manganese (Mn). Mn removal is a challenge because manganese can only be removed if the concentration of Fe AAT is less than 5 mg / L. One of the technologies that can be used to remove Mn from acid mine drainage is the constructed wetland system (CW). CW performance is influenced by AAT debits. To determine the efficiency of removal of manganese (Mn) and the pH value in CW, then in this study used Surface Flow Constructed Wetland (SFCW) with dimensions of 150cm x 50 cm x 75 cm with the continuous flow with variations in debit. In this study, AAT debit will be varied, namely D0 7.1 mL / min; D1 8.8 mL / min; D2 10.5 mL / min, and D3 12.2 mL / min. The results showed the best pH increase at CW D0 7.1 mL/min for the 4th period with a pH value of 4.3. The best Mn removal ability at CW D0 7.1 mL/min in the first period was 3.3 mg / L with an efficiency of 62%.

*Keywords: Acid mine drainage, Debit variation, Manganese, Surface flow Constructed Wetland.*

## 1. PENDAHULUAN

Tingginya air asam tambang di Indonesia disebabkan oleh beberapa faktor, yakni tingginya curah hujan serta mineral dari sisa bahan galian. Pada proses pembentukan air asam tambang (AAT) terdapat air dengan warna merah jingga. Hal ini disebabkan adanya oksidasi ion ferro pada mineral pirit menjadi ion ferri. Secara fisik, aliran air seperti sungai dan mata air tergusur akibat adanya aktivitas penyingkiran lapisan tanah di atas batubara. Secara kimia, mineral yang terdapat pada batuan batubara adalah mineral sulfidik, dimana ketika mineral sulfidik bertemu dengan air serta udara akan teroksidasi sehingga akan terbentuk asam sulfat. Asam sulfat termasuk asam yang kuat sehingga mengakibatkan penurunan pH pada air dan tanah (Widyati, 2009).

Pengelolaan AAT meliputi pencegahan terbentuknya AAT serta penanganan air AAT yang terbentuk. Pembentukan AAT tidak akan dapat sepenuhnya dicegah. Oleh karena itu diperlukan penanganan untuk mengurangi dampak yang mungkin akan ditimbulkan dengan cara mengolah AAT yang terbentuk di lingkungan. Pengolahan AAT untuk memperbaiki kualitas air agar sesuai dengan baku mutu yang diterapkan oleh pemerintah untuk dilepaskan ke badan air. Penanganan AAT dapat dikategorikan menjadi pengolahan aktif, pengolahan pasif, dan pengolahan di tempat (Johnson dan Barrie, 2005).

Salah satu teknologi pengolahan pasif untuk AAT yakni dengan menggunakan lahan basah buatan (LBB). LBB dikembangkan untuk menurunkan kandungan logam berat di perairan, LBB adalah suatu sistem pengolahan air limbah yang murah, mudah dioperasikan dan dirawat serta berkelanjutan sehingga cocok untuk daerah tropis dan negara berkembang seperti Indonesia (Meutia dkk., 2001).

Mangan (Mn) merupakan salah satu unsur yang terdapat pada air asam tambang. Mn merupakan kation logam yang memiliki karakteristik kimia mirip dengan besi. Mangan berada dalam bentuk manganous ( $Mn^{2+}$ ) dan manganik ( $Mn^{3+}$ ) (Effendi, 2003). Pada AAT, Mn hadir dalam bentuk manganous dan akan lebih stabil pada pH yang lebih tinggi dibandingkan dengan bentuk lain yang teroksidasi seperti  $Mn^{4+}$  (Prihatini, dkk., 2016).

Penyisihan Mn menjadi tantangan tersendiri karena mangan hanya dapat disisihkan jika konsentrasi Fe AAT kurang dari 5 mg/L (Lesley dan Daniel, 2005). Salah satu teknologi yang dapat digunakan untuk menyisihkan Mn air asam tambang adalah dengan sistem lahan basah buatan (LBB). Pada penelitian Prihatini dan Iman (2015) sistem lahan basah buatan aliran vertikal bawah permukaan (LBB-AVBP) memiliki efisiensi penyisihan Mn sebesar 79,88%. Penelitian lainnya oleh Yunus dan Prihatini (2018) efisiensi sistem lahan basah buatan aliran permukaan (LBB-AP) untuk menyisihkan Mn berkisar antara 70,08 – 79,84%. Berbeda dengan penelitian sebelumnya, pada sistem LBB di penelitian ini digunakan media *overburden* (OB) yang dikombinasikan dengan tandan kosong kelapa sawit (TKKS). OB ketersediaannya melimpah di area pertambangan dan belum dapat digunakan dengan baik karena miskin hara dan mengandung banyak logam berat. TKKS merupakan limbah padat

dari perkebunan kelapa sawit. Selain media, kinerja LBB dipengaruhi juga oleh debit AAT, sehingga pada penelitian ini ingin diketahui efisiensi sistem LBB dengan variasi debit.

## 2. METODOLOGI PENELITIAN

### 2.1. Lokasi dan Waktu Penelitian

Lokasi penelitian ini bertempat di PT. Jorong Barutama Greston dengan rincian pengujian sampel influen di Balai Riset dan Standarisasi Industri Banjarbaru, pengambilan air asam tambang di void M45-C, pengambilan OB di void M45-C, pengambilan TKKS di void M45-C, pengambilan tanaman di area sekitar tambang PT. Jorong Barutama Greston, lokasi penelitian di *Swampy* PT. Jorong Barutama Greston, dan pengujian sampel efluen di laboratorium PT. Jorong Barutama Greston,

### 2.2. Alat dan Bahan

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah reaktor berukuran 150 cm x 50 cm x 75 cm, pipa PVC, pipa L, tendon air berkapasitas 3300 L, keran, klep, botol sampel, gelas ukur, pH meter digital, timbangan, spektrofotometer Hch DR3900, *Ice Gel*, *Cool Box*, dan kamera digital. Sedangkan bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah OB, TKKS, purun tikus, Air Asam Tambang PT Jorong Barutama Greston Kecamatan Jorong Kabupaten Tanah Laut Provinsi Kalimantan Selatan, selotip pipa, lem pipa, kain kasa, larutan *Buffer* pH 4 dan pH 7, larutan HNO<sub>3</sub>, dan bahan kimia untuk analisis parameter uji Mn.

### 2.3. Prosedur Penelitian

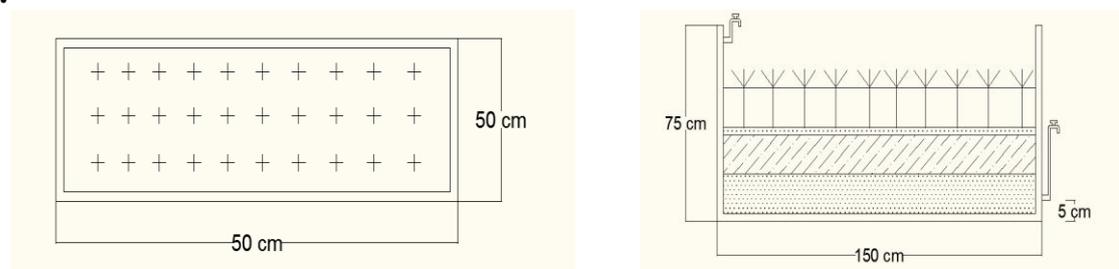
Prosedur yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

#### 1. Persiapan Tanaman

Media tanam berupa OB dan TKKS yang sudah disiapkan kemudian disusun secara layer yang berfungsi sebagai media filtrasi. Media tanam OB yang dibutuhkan adalah 160 kg sedangkan Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) adalah 25 kg. Tanaman berupa purun tikus (*Eleocharis dulcis*) yang sudah disiapkan dan dipilih dengan jumlah rumpun relatif sama  $\pm 30$ . Kemudian menanam tanaman purun tikus (*Eleocharis dulcis*) dengan jarak tanam tanaman yaitu 15 x 15 cm. Selanjutnya tanaman di aklimatisasi dengan cara memberikan air biasa 100 %, air biasa 50% + air asam tambang 50%, dan air asam tambang 100%.

#### 2. Pengoperasian Reaktor

Reaktor LBB dioperasikan dengan memasukkan AAT ke masing-masing reaktor dengan aliran kontinyu. Reaktor dioperasikan selama 4 periode waktu tinggal masing-masing variasi debit (**Tabel 1**). Kemudian mengambil sampel air *effluent* reaktor untuk dilakukan pengukuran pH dan pengujian parameter Mn. Desain reaktor dapat dilihat pada **Gambar 1**.



**Gambar 1.** Tampak Atas dan Tampak Samping Desain LBB

**Tabel 1.** Rancangan Penelitian Pada sistem LBB-ABP

Kode variasi	Debit (mL/menit)	Waktu Tinggal (hari)
D0	7,1	7
D1	8,8	6
D2	10,5	5
D3	12,2	4

**2.4. Analisis Data**

Data konsentrasi Mn dianalisis untuk mengetahui efisiensi sistem LBB dengan menggunakan persamaan yang ditunjukkan pada Pers (1) sebagai berikut:

$$E = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100 \% \quad \dots(1)$$

Dimana:

E = Persen penurunan (%)

C<sub>0</sub> = Kadar Mn Awal (mg/L)

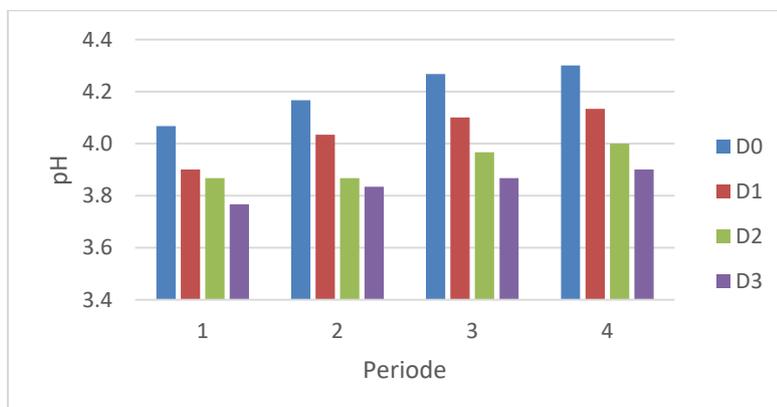
C<sub>e</sub> = Kadar Mn akhir (mg/L)

Data-data yang diperoleh tersebut selanjutnya disajikan dalam tabel dan grafik yang kemudian dijabarkan secara deskriptif. Analisis data dilakukan menggunakan Microsoft Excel.

**3. HASIL DAN PEMBAHASAN**

**3.1. Kinerja Sistem LBB-AP terhadap Nilai pH**

Parameter lingkungan yang diukur pada penelitian ini adalah pH influen dan efluen. Kadar pH yang rendah merupakan salah satu masalah utama perairan. Nilai pH menggambarkan seberapa besar tingkat keasaman atau kebasaan suatu perairan. pH merupakan gambaran jumlah atau aktivitas ion hidrogen dalam perairan (Efendi, 2003). Hasil pengukuran pH pada influen adalah 3.6. Pada penelitian ini, dilakukan pengukuran pH antara influen dan effluen. Berikut hasil pengukuran pH pada effluen air asam tambang yang ditampikan pada **Gambar 2.**



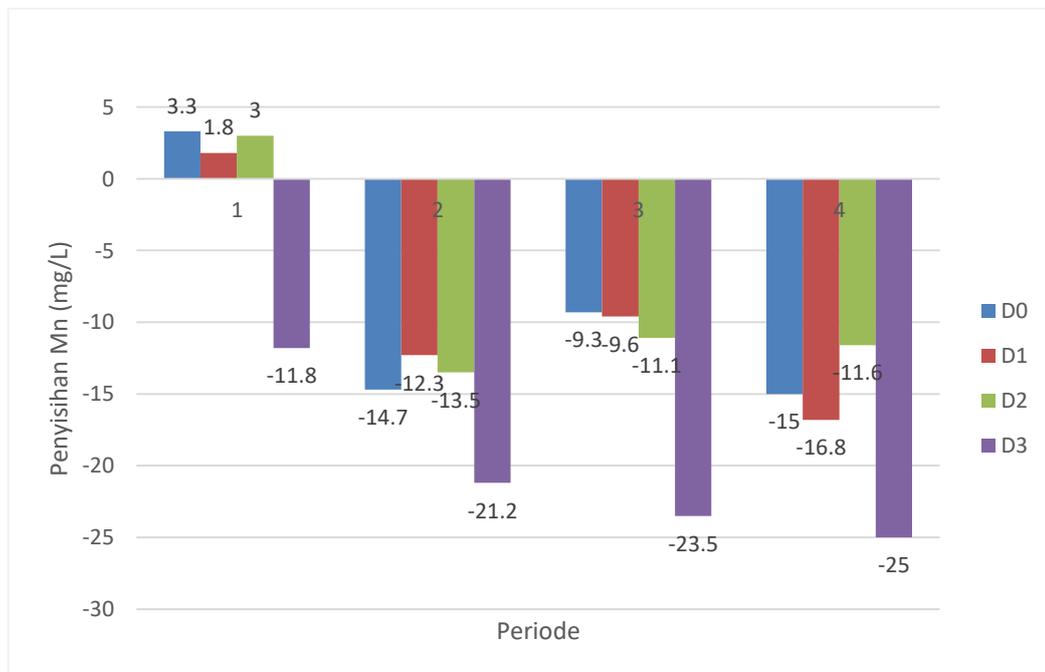
**Gambar 2.** Grafik Effluen pH

Debit menentukan waktu detensi. Semakin kecil nilai debit, maka waktu tinggal semakin lama sehingga air limbah yang diproses oleh mikroorganism, media, dan tanaman semakin baik. D0 merupakan LBB dengan debit 7.1 mL/menit, D1 merupakan variasi debit dengan nilai 8,8 mL/menit, D2 merupakan variasi debit dengan nilai 10,5 mL/menit, dan D3 merupakan variasi dengan debit 12,2 mL/menit. Perbandingan kemampuan untuk kenaikan nilai pH antar variasi dapat dilihat pada **Gambar 1**. Pada **Gambar 1**, kenaikan nilai pH pada reaktor D0 periode ke 1, 2, 3, dan 4 berturut-turut sebesar 0.5, 0.6, 0.7 dan 0.7.

Pada reaktor dengan variasi debit D1 nilai kenaikan pH pada periode ke 1, 2, 3, dan 4 berturut-turut sebesar 0.3, 0.4, 0.5, dan 0.5. Pada reaktor dengan variasi debit D2 nilai kenaikan pH pada periode ke 1, 2, 3, dan 4 berturut-turut sebesar 0.3, 0.3, 0.4, dan 0.4. Sedangkan pada reaktor dengan variasi debit D3 nilai kenaikan pH pada periode ke 1, 2, 3, dan 4 berturut-turut sebesar 0.2, 0.2, 0.3, dan 0.3. Berdasarkan data tersebut dapat diketahui bahwa nilai pH tiap variasi di setiap periode meningkat. Peningkatan pH terbaik terdapat pada Debit D0 periode ke 4 dengan nilai pH 4.3. Peningkatan pH tersebut terjadi akibat interaksi antara proses pengendapan, sedimentasi, adsorpsi, ko-presipitasi, pertukaran kation, fotodegradasi, fitoakumulasi, biodegradasi, aktifitas mikrobia, dan penyerapan oleh tanaman (Sheoran and Sheoran, 2006). Proses-proses yang terjadi di LBB tersebut melibatkan tanaman, media dan mikroorganism yang ada pada LBB (Munawar, 2007; Vymazal, 2010; Vymazal dan Kropfelova, 2008; Younger *et al.*, 2002, Prihatini, *et al.*, 2016). Pada lahan basah buatan penyisihan mangan sebagian besar diatur oleh proses fitoremediasi (Kularatne, *et al.*, 2009).

**3.2. Efisiensi Sistem LBB-AP Terhadap Konsentrasi Mn**

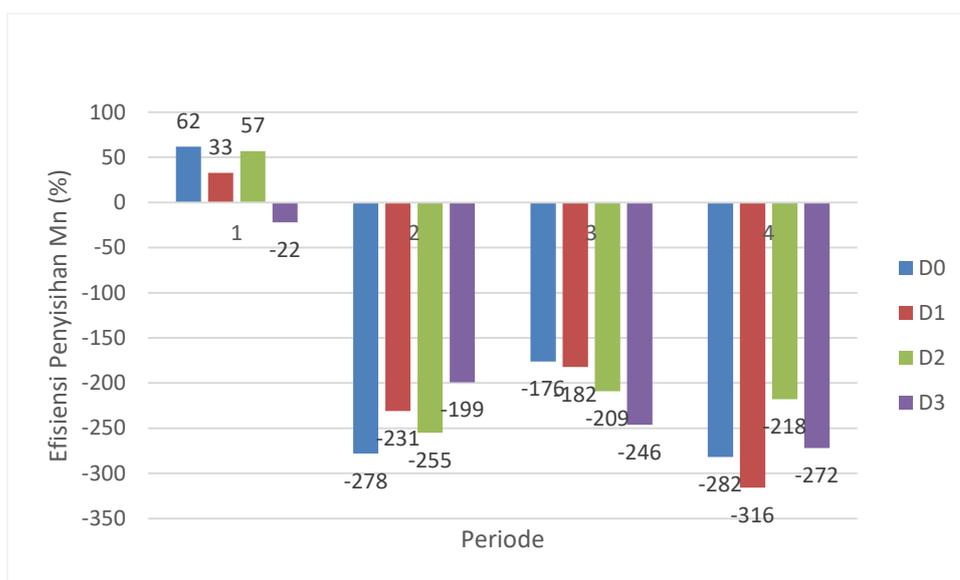
Konsentrasi Mn pada influen sistem LBB yaitu 5,3 mg/L. Sedangkan hasil perhitungan penyisihan Mn (mg/L) pada sistem LBB pada setiap periode ditampilkan pada **Gambar 2**.



**Gambar 3.** Grafik Efluen Konsentrasi Mn

Kemampuan penyisihan konsentrasi Mn pada sistem LBB-AP dengan variasi debit dapat dilihat pada **Gambar 3**. Pada **Gambar 3**, menunjukkan perbandingan penyisihan Mn berdasarkan variasi debit. Pada reaktor dengan D0 mampu menyisihkan Mn pada periode ke 1, 2, 3, dan 4 berturut-turut sebesar 3.3 mg/l, -14.7 mg/l, -9.3 mg/l, dan -15 mg/l. Pada reaktor dengan variasi debit D1 mampu menyisihkan Mn pada periode ke 1, 2, 3, dan 4 berturut-turut sebesar 1.8 mg/l, -12,3 mg/l, -9.6 mg/l, dan -16.8 mg/l. Pada reaktor dengan variasi debit D2 mampu menyisihkan Mn pada periode ke 1, 2, 3, dan 4 berturut-turut sebesar 3 mg/l, -13.5 mg/l, -11.1 mg/l, dan -11.6 mg/l. Sedangkan pada reaktor dengan variasi debit D3 mampu menyisihkan Mn pada periode ke 1, 2, 3, dan 4 berturut-turut sebesar -11.8 mg/l, -12.2 mg/l, -23.5 mg/l, dan -25 mg/l. Berdasarkan data tersebut didapatkan bahwa nilai konsentrasi Mn fluktuatif. Namun, konsentrasi Mn terendah terdapat pada D0 Periode 1. Reaktor D0 memiliki waktu detensi selama 7 hari. Sedangkan konsentrasi Mn tertinggi terdapat pada reaktor D3 periode 4. Pada Periode selanjutnya, setiap perlakuan mengalami kenaikan nilai Mn.

Berdasarkan data penyisihan konsentrasi Mn pada Gambar 3 kemudian dihitung efisiensi sistem LBB-AP (Gambar 4).



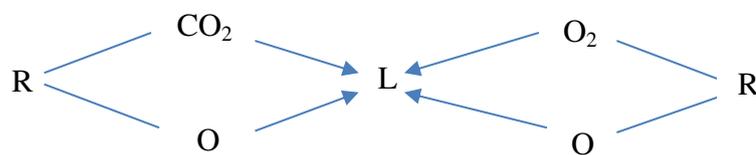
**Gambar 4.** Grafik Efisiensi Penyisihan Mn antar Variasi Debit

Pada penelitian yang telah dilakukan diketahui hasil penelitian hanya efisien pada D0, D1, dan D2 periode 1. Sedangkan pada periode selanjutnya, efisien sistem tidak dapat ditentukan karena terjadi peningkatan konsentrasi Mn di efluen LBB dibandingkan dengan konsentrasi Mn di influen LBB. Efisiensi pada reaktor D0 pada periode 1, 2, 3, dan 4 berturut-turut sebesar 62%, -278%, -176%, dan -282%. Efisiensi pada reaktor D1 pada periode 1, 2, 3, dan 4 berturut-turut sebesar 33%, -231%, -182%, dan -316%. Efisiensi pada reaktor D2 pada periode 1, 2, 3, dan 4 berturut-turut sebesar 57%, -255%, -209%, dan -218%. Sedangkan efisiensi pada reaktor D3 pada periode 1, 2, 3, dan 4 berturut-turut sebesar -22%, -199%, -246%, -272%. Terjadinya proses pencucian kembali (*leaching*) pada media LBB-AP yang menggunakan OB diduga menyebabkan peningkatan Mn pada efluen. OB merupakan batuan penutup yang secara litologi berada di atas batuan utama yang akan ditambang. Batuan ini disebut pula sebagai *Waste Rock* karena tidak dimanfaatkan nilai ekonomisnya (Oktarly,

2015). OB yang ada pada reaktor teroksidasi kembali oleh AAT yang dialirkan sehingga nilai Mn pada air yang terproses kembali meningkat.

Pada penelitian ini, variasi debit juga ditentukan oleh waktu tinggal. Waktu tinggal adalah periode (dalam waktu) limbah berada di dalam sistem pengolahan. Secara teori lebih lama limbah berada di sistem maka proses pengolahan lebih baik. Namun sebaliknya, jika terlampau cepat maka limbah hanya akan melaluinya saja sehingga proses pengolahan tidak berjalan optimal. Waktu tinggal juga didefinisikan sebagai periode waktu untuk volume tertentu untuk dipertahankan dalam volume kerja reaktor. Pada penelitian ini waktu tinggal yang digunakan pada D0 adalah 7 hari, D1 adalah 6 hari, D2 adalah 5 hari, sedangkan pada D3 adalah 4 hari. Proses yang terjadi pada LBB meliputi proses gabungan fisika-kimia dan biologi. Selama waktu tinggal tersebut AAT mengalami proses yang terjadi secara fisika-kimia meliputi proses filtrasi, adsorpsi, dan sedimentasi di LBB. Sedangkan proses biologis melibatkan tanaman, media, dan mikroorganisme yang terdapat pada sistem LBB. Waktu tinggal secara langsung berpengaruh nyata pada peningkatan nilai pH dan penurunan Mn. Hal ini disebabkan semakin lama waktu tinggal, akan semakin lama waktu yang tersedia bagi sistem untuk menurunkan Mn yang ada pada AAT. Mikroorganisme pengurai memiliki lebih banyak waktu untuk mendegradasi. Namun, ini hanya berlaku pada periode 1, sedangkan pada periode lain, hasil penelitian menunjukkan nilai Mn yang naik-turun/fluktuatif. Kenaikan/penurunan nilai Mn di periode lain dapat disebabkan oleh adanya leaching pada media yang digunakan.

Ketersediaan hayati (*bioavailability*) logam berat pada media dipengaruhi oleh beberapa faktor, salah satunya yakni reaksi pengompleksan. Ion logam berat pada senyawa organik, seperti asam-asam humat dan fulvat akan membentuk kelat.



L adalah kation logam yang terkelat, R adalah radikal hidrokarbon, dan CO<sub>2</sub> serta O adalah kelompok fungsional yang telah mendisosiasikan H<sup>+</sup>. dalam keadaan ini mobilitas logam berat meningkat karena pengendapannya tidak lagi tunduk pada kenaikan pH. Logam berat menjadi lebih mudah berpindah ke bagian tubuh tanah yang lebih dalam (terkoluvilasi) atau lebih mudah terlindi (*leached*). Kelasi juga menurunkan toksisitas larutan logam berat. Akan tetapi kealsi juga memicu pelapukan mineral dan batuan, berarti melancarkan pelepasan unsur logam berat.

#### 4. KESIMPULAN

Pada penelitian ini peningkatan pH dan penyisihan Mn terbesar terdapat pada sistem lahan basah buatan aliran permukaan (LBB-AP) dengan debit 7,1 mL/min dengan waktu detensi 7 hari dengan efisiensi sistem sebesar 62%. Untuk meningkatkan kinerja sistem LBB-AP dengan media *overburden* (OB) perlu dilakukan modifikasi terhadap komposisi media pada sistem.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Para penulis mengucapkan terima kasih kepada PT. Jorong Barutama Greston dan Pusat Studi Pasca Tambang Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat Universitas Lambung Mangkurat yang telah mendanai penelitian ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- Effendi, H. (2003). *Telaah Kualitas Air Bagi Pengelolaan Sumber Daya Dan Lingkungan Perairan*. Kanisius. Yogyakarta.
- Johnson dan Barrie. (2005). Acid Mine Drainage Remediation Options : a review. *Science of the Total Environment* 338. School of Biological Sciences, University of Wales, Bangor An *International Journal of Environment*.
- Kularatne, R.K.A., Kasturiarachchi, J.C., Manatunge, J.M.A., dan Wijeyekoon, S.L.J. (2009). Mechanisms of Manganese Removal from Wastewaters in Constructed Wetlands Comprising Water Hyacinth (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms) Grown under Different Nutrient Conditions. *Water Environment Research*, 81, pp. 165-172.
- Lesley, B. dan Daniel, H. An appraisal of iron and manganese removal at Shilbottle and Whittle wetland sites in Northumberland, UK. *9th International Mine Water Congress, 2005. 331-337*.
- Meutia, A. A., Sadi N.H., dan Ratnawati K. (2001). Penyisihan Logam Berat Tembaga, Seng, Besi, dan Mangan di dalam Lahan Basah Buatan. *Jurnal Oseanologi dan Limnologi*, 33, 63-76.
- Munawar, A. (2007). Pemanfaatan Sumberdaya Biologis Lokal Untuk Pengendalian Pasif Air Asam Tambang: Lahan Basah Buatan. *Jurnal Ilmu Tanah dan Lingkungan*, 7, 31-42.
- Oktarly, R. (2015). *Efektivitas Pengelolaan Batuan Sisa (Water Rock) Dengan Menggunakan Metode Layering dan Blending Sebagai Upaya Pengendalian Pembentukan Air Asam Tambang*. Universitas Lambung Mangkurat.
- Prihatini, N.S., dan Iman, M.S. (2015). Pengolahan Air Asam Tambang Menggunakan Sistem Lahan Basah Buatan: Penyisihan Mangan. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 1, 17-23.
- Prihatini, N.S., Priatmadi, B.J., Masrevaniah, A., dan Soemarno (2016). Effects of the Purun Tikus (*Eleocharis dulcis* (Burm. F.) Trin. ex Hensch) Planted in the Horizontal Subsurface Flow-Constructed Wetlands (HSSF-CW) on Iron (Fe) Concentration of the Acid Mine Drainage. *J. Appl. Environ. Biol. Sci.*, 6, 258-264.
- Prihatini, N.S., Nirtha, I., Iman, M.S. (2016). Role of Purun Tikus in Vertical Subsurface Flow Constructed Wetland in Treating Manganese (Mn) From Coal Mine Drainage. *Tropical Wetland Journal*, 2, 1 - 7.
- Sheoran, A.S., dan Sheoran, V. (2006). Heavy metal removal mechanism of acid mine drainage in wetlands: A critical review. *Minerals Engineering*, 19 105–116.
- Vymazal, J., dan Kropfelova, L. (2008). Wastewater Treatment in Constructed Wetlands with Horizontal Sub-Surface Flow, *Czech Republic, Springer Science*.

- Vymazal, J. (2010). Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. *Water Air Soil Pollut*, 2, 530-549.
- Widyati, E. (2009). Kajian Fitoremediasi Sebagai Salah Satu Upaya Menurunkan Akumulasi Logam Berat Akibat Air Asam Tambang Pada Lahan Bekas Tambang Batubara. *Jurnal Hutan Tanaman*, Vol. 2 No.2, Agustus 2009, 67-75.
- Younger, P.L., Banwart, S.A., dan Hedin, R.S. (2002). Passive Treatment of Polluted Mine Waters. *Environmental Pollution*, 5, 311-396.
- Yunus, R., dan Prihatini, N.S. (2018). Fe and Mn phyto remediation of acid coal mine drainage using water hyacinth (*Eichornia crassipes*) and chinese water chestnut (*Eleocharis dulcis*) on the constructed wetland system *International Journal of Bioscience*, 12, 273-282.