

Kajian Pengolahan Air Asam Tambang Industri Pertambangan Batu Bara dengan *Constructed Wetland*

Salsabila Adnin Maulida dan Ipung Fitri Purwanti
Departemen Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: purwanti@enviro.its.ac.id

Abstrak—Air asam tambang adalah limpasan air yang terbentuk dari proses oksidasi mineral sulfida yang terekspos dengan udara di atmosfer dan bercampur dengan air. Air asam tambang dapat berasal dari proses penambangan terbuka, pengelolaan batuan buangan, penimbunan batuan dan pengelolaan limbah tailing. Pencemaran air asam tambang di badan air penerima terjadi karena pengolahan air asam tambang yang kurang tepat. Permasalahan pencemaran air asam tambang dapat menimbulkan masalah lingkungan dan kesehatan masyarakat. Contoh kasus pencemaran air asam tambang di badan air yaitu pencemaran air asam tambang dari industri pertambangan batu bara yang terjadi di Sungai Palakan, Kalimantan Timur yang telah berlangsung lebih dari dua dekade. Pengolahan eksisting yang diterapkan yaitu pengendapan TSS pada *settling pond* industri tambang batu bara. Pengolahan lanjutan yang direkomendasikan setelah melalui unit *settling pond* yaitu *constructed wetland*. *Constructed wetland* memanfaatkan simbiosis yang berlangsung secara alami antara tumbuhan air dengan mikroorganisme pada media di sekitar sistem perakaran (rhizosfer). Tujuan dari kajian ini adalah menganalisis penerapan metode *constructed wetland* untuk mengolah air asam tambang sehingga kualitasnya memenuhi baku mutu saat dilepas ke badan air penerima. Debit air asam tambang yang diolah yaitu 0,84 m³/detik yang diolah pada CW berukuran 8,04 ha. Tumbuhan yang dipilih adalah eceng gondok dengan tipe tumbuhan *single plant* dan tipe kolam *sub-surface flow* arah aliran horizontal. Kebutuhan tumbuhan eceng gondok yaitu sejumlah 322.160 tumbuhan yang ditanam pada 4 kompartemen berbeda. Kualitas efluen air asam tambang setelah diolah dengan *constructed wetland* memenuhi baku mutu dan aman untuk dilepas ke badan air penerima.

Kata Kunci—*Constructed Wetland*, *Fitotreatment*, Pencemaran Air, Pengolahan Air Asam Tambang, Tumbuhan Hiperakumulator.

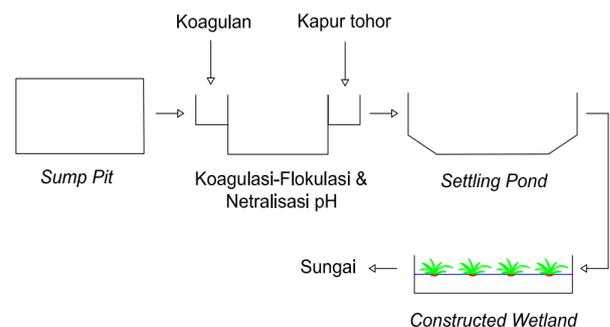
I. PENDAHULUAN

PENCEMARAN lingkungan saat ini tengah terjadi hampir di seluruh negara di dunia. Faktor penyebab terjadinya pencemaran lingkungan dapat berasal dari berbagai sumber, seperti kegiatan industri, kegiatan sarana transportasi, kegiatan domestik, dan aktivitas makhluk hidup lainnya. Pencemaran air dari aktivitas industri salah satunya berasal dari industri pertambangan batu bara dalam bentuk air asam tambang. Air asam tambang (AAT) adalah limpasan air yang terbentuk dari proses oksidasi mineral sulfida yang terekspos dengan udara di atmosfer dan bercampur dengan air. Proses oksidasi sulfida ini menghasilkan cairan yang mengandung asam sulfat dan meningkatkan konsentrasi logam seperti besi, mangan, aluminium, kadmium dan lainnya [1].

Kasus pencemaran lingkungan perairan akibat pengelolaan air asam tambang yang kurang tepat salah satunya terjadi pada sejumlah sungai di Kalimantan Timur akibat air asam



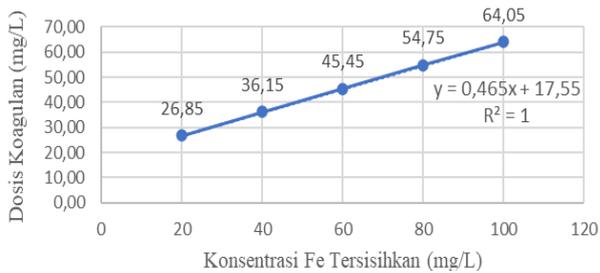
Gambar 1. Wilayah operasi industri pertambangan batu bara.



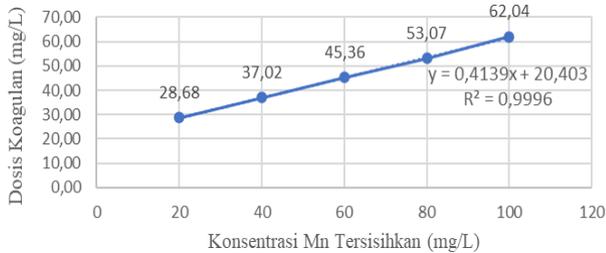
Gambar 2. Diagram alir pengolahan air asam tambang industri pertambangan batu bara.

tambang dari aktivitas industri pertambangan batu bara. Provinsi Kalimantan Timur memiliki potensi sumber daya logam dan non logam yang tinggi yang mengakibatkan banyaknya industri pertambangan yang beroperasi di lokasi tersebut, baik pertambangan skala kecil yang dikelola oleh rakyat maupun pertambangan skala besar. Daerah aliran Sungai Palakan juga tidak terkecuali dilintasi oleh area kerja aktivitas pertambangan, di mana salah satu industri pertambangan batu bara membuang limbah tambangnya ke badan air Sungai Palakan.

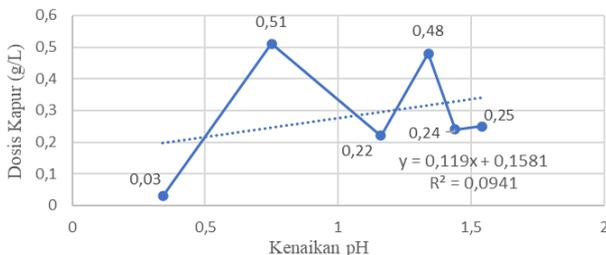
Hasil uji sampel air limbah di kolam penampungan air limbah menunjukkan nilai pH, konsentrasi TSS dan logam Fe dan Mn tidak memenuhi baku mutu yang mengacu pada Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 113 Tahun 2003 tentang Baku Mutu Air Limbah bagi Usaha dan atau Kegiatan Pertambangan Batu Bara. Salah satu metode pengolahan air asam tambang yang direkomendasikan yaitu *constructed wetland*. *Constructed wetland* merupakan lahan basah buatan yang dibangun menyerupai lahan basah alami yang berfungsi sebagai lahan pemurnian air limbah [2]. Prinsip kerja *constructed wetland* memanfaatkan simbiosis antara tumbuhan air dengan mikroorganisme pada suatu media di sekitar sistem perakaran tumbuhan (rhizosfer) untuk membantu meningkatkan pH dan menurunkan konsentrasi logam Fe dan Mn terlarut serta TSS pada air asam tambang. *Constructed wetland* memiliki keuntungan dari segi biaya



Gambar 3. Hubungan dosis koagulan dengan penyisihan logam Fe.



Gambar 4. Hubungan dosis koagulan dengan penyisihan logam Mn.



Gambar 5. Hubungan dosis kapur tohor dengan kenaikan pH.

dan ramah lingkungan, dapat mengolah logam berat, efisiensi pengolahan tinggi, biaya perencanaan, pengoperasian dan pemeliharaan terjangkau serta tidak membutuhkan keterampilan tenaga kerja yang tinggi. Kajian pengolahan air asam tambang pada industri pertambangan batu bara dilakukan untuk mengetahui efektivitas *constructed wetland* untuk mengolah air asam tambang dan jenis tumbuhan yang optimal digunakan pada proses pengolahan.

II. METODE KAJIAN

Metode kajian yang digunakan adalah dengan mengkaji dari berbagai literatur. Literatur yang digunakan berasal dari jurnal penelitian nasional maupun internasional, buku teks, disertasi dan laporan tugas akhir yang berhubungan dengan topik yang dikaji yaitu pengolahan air asam tambang industri pertambangan batu bara dengan *constructed wetland*. Data tentang kasus pencemaran air asam tambang di industri pertambangan batu bara merupakan data sekunder yang diperoleh dari berbagai literatur.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Gambaran Umum Wilayah Studi

Industri pertambangan batu bara yang dikaji memiliki luas wilayah konsesi sebesar 24.121 ha. Masa kontrak kerjanya diberlakukan sejak tahun 1998 dan berlaku hingga tahun 2028 dengan lokasi operasi berada di Kabupaten Kutai Kartanegara, Kutai Timur, dan Kota Bontang, Provinsi Kalimantan Timur. Perusahaan ini memiliki cadangan batu bara pada awal beroperasi sebanyak 757,38 juta ton dan yang tersisa pada tahun 2020 adalah sejumlah 37,78 juta ton.

Tabel 1. Hasil uji sampel air pada efluen *settling pond* SP-34 berdasarkan baku mutu limbah pertambangan batu bara

Parameter	Satuan	Hasil Uji	Baku Mutu	Keterangan
pH	-	2,57	6,0-9,0	Tidak memenuhi baku mutu
TSS	mg/L	520	400	Tidak memenuhi baku mutu
Fe	mg/L	32,61	7	Tidak memenuhi baku mutu
Mn	mg/L	18,22	4	Tidak memenuhi baku mutu

Tabel 2. Konsentrasi parameter pencemar air asam tambang pada efluen *settling pond*

Parameter	Efisiensi SP (%)	Konsentrasi Influen SP	Konsentrasi Efluen SP	Satuan
pH	27,63	3,51	4,48	-
TSS	66,67	1.499	499,67	mg/L
Fe	50,00	24,40	12,20	mg/L
Mn	53,85	29,90	13,80	mg/L

Tabel 3. Efisiensi penyisihan parameter pencemar air asam tambang pada masing-masing tumbuhan

Tumbuhan	Efisiensi (%)			
	pH	Fe	Mn	TSS
Lembang	44,71	99,94	88,36	89,40
Eceng gondok	51,32	85,43	95,04	92,48
Purun tikus	50,99	80,10	72,91	65,33
Kayu apu	55,10	31,00	100,00	91,59
Kiambang	23,03	93,00	73,33	80,60

Hingga masa kontrak perusahaan berakhir, terdapat sejumlah 53 lubang tambang terbuka dengan total luas 2.823,73 ha yang akan ditinggalkan. Lubang tambang tersebar ke dalam dua blok yaitu blok barat dan blok timur, hal ini dapat dilihat pada Gambar 1. Terdapat sejumlah 15 *settling pond* (SP) milik perusahaan. Tiga *settling pond* tersebar di blok barat dan 12 *settling pond* berlokasi di blok timur. Diantaranya sejumlah 6 *settling pond* yang berada di blok timur mengalirkan air limbahnya ke Sungai Palakan lalu bermuara ke Sungai Santan [3].

B. Pencemaran Air Asam Tambang di Sungai Palakan Akibat Industri Pertambangan Batu Bara

Pencemaran air asam tambang akibat industri pertambangan batu bara di Sungai Palakan diperkirakan telah terjadi selama dua dekade terakhir. Hasil pemeriksaan yang dilakukan oleh Jaringan Advokasi Tambang (JATAM) Kalimantan Timur pada tahun 2020 membuktikan bahwa perusahaan tambang telah menyebabkan pencemaran dan membunuh sejumlah sungai di sekitar wilayah konsesinya di Kalimantan Timur. Tingginya kandungan logam seperti Fe dan Mn serta adanya peningkatan keasaman tidak hanya berasal dari air asam tambang yang mengalir dari *settling pond* tetapi juga disebabkan oleh rembesan air (*run off*) dari tumpukan batu bara dan endapan lumpur. Hal ini merupakan efek dari kegiatan operasi pertambangan batu bara yang sudah mengandung pH asam dan sumber logam yang juga berasal dari kegiatan penggalian, pengangkutan dan penimbunan batuan penutup.

Kualitas air Sungai Palakan telah memburuk sejak dua dekade terakhir akibat pembuangan limbah air asam tambang oleh industri pertambangan batu bara. Air sungai berubah

Tabel 4.
Nilai BCF dan TF tumbuhan terhadap logam Fe

	Lembang	Eceng gondok	Purun tikus	Kayu apu	Kiambang
Konsentrasi Fe di AAT (mg/L)	10,22	10,22	114,2	523,60	10,22
Berat kering Fe di akar (mg/kg)	15.116	5.350	24.825	2.511	13.231
Berat kering Fe di daun (mg/kg)	1.432	394	40.667	974,10	2.842
BCF (L/kg)	1.619	562,31	573,49	6,66	1.573,47
TF	0,09	0,07	1,64	0,39	0,21

Tabel 5.
Nilai BCF dan TF tumbuhan terhadap logam Mn

	Lembang	Eceng gondok	Purun tikus	Kayu apu	Kiambang
Konsentrasi Mn di AAT (mg/L)	0,86	0,86	27,23	234	0,86
Berat kering Mn di akar (mg/kg)	936	1.120	593	1.160	7.682
Berat kering Mn di daun (mg/kg)	1.484	1.366	1.213	331	516
BCF (L/kg)	2.817	2.894	66,32	6,36	9.543,66
TF	1,59	1,22	2,05	0,29	0,07

menjadi sangat keruh, berwarna kuning pekat hingga kehijauan, dan disertai dengan peningkatan volume lumpur. Warga yang bermukim di tepi Sungai Palakan mulai kesulitan memperoleh akses air bersih. Penumpukan lumpur juga menyebabkan terjadinya pendangkalan pada Sungai Palakan sehingga menghambat mobilitas masyarakat. Operasi pertambangan dan pembuangan limbah tambang juga berkontribusi pada peningkatan volume dan frekuensi banjir. Penumpukan sedimen dan lumpur di dasar sungai menyebabkan air sungai melimpas dan membanjiri pemukiman warga setiap turun hujan.

Pencemaran air asam tambang juga menyebabkan kekayaan biota asli Sungai Palakan menjadi berkurang. Penurunan populasi biota perairan disebabkan oleh tingginya tingkat keasaman air sungai dan peningkatan kekeruhan sehingga menghambat masuknya cahaya matahari ke dalam air di mana hal ini akan mengganggu proses metabolisme organisme akuatik. Air sungai berubah warna menjadi kehijauan akibat terjadinya ledakan populasi algae di perairan yang merupakan efek dari pembuangan limbah tambang secara besar-besaran. Ledakan populasi algae ini merugikan berbagai hewan dan tumbuhan air yang hidup di sungai. Hal ini turut berkontribusi pada kematian ikan di Sungai Palakan. Selain itu, air sungai dalam kondisi tercemar yang digunakan sebagai sumber irigasi pertanian telah merusak ratusan hektar ladang dan mengakibatkan terjadinya gagal panen. Kandungan lumpur dan pH air sungai yang meningkat menyebabkan produktivitas tumbuhan terganggu dan berakibat pada pembusukan dan kematian tumbuhan.

C. Penanganan Pencemaran Air Asam Tambang Eksisting

Untuk memastikan kualitas air asam tambang memenuhi baku mutu yang ditetapkan, perusahaan membuat sejumlah kolam pengendapan (*settling pond*) di setiap lokasi yang berpotensi menyebabkan terjadinya rembesan air asam tambang. Perusahaan tercatat memiliki sejumlah 15 *settling pond*, di mana tiga diantaranya tersebar di blok barat dan 12 lainnya berlokasi di blok timur. *Settling pond* adalah suatu kolam yang berfungsi sebagai kolam pengendapan semua air dari areal tambang, baik air tanah maupun air hujan dan bertujuan untuk menjernihkan air yang keluar ke badan air penerima. Di dalam *settling pond*, terjadi proses pengolahan limbah diantaranya pengendapan (sedimentasi), penggumpalan (koagulasi), pencampuran (flokasi) serta netralisasi [4].

Usaha pengendalian terhadap air asam tambang yang telah dilakukan oleh perusahaan antara lain usaha pencegahan (*preventive*) dan pengelolaan (*corrective*). Usaha pencegahan (*preventive*) yang dilakukan meliputi penimbunan dan penataan batuan sesuai karakteristiknya dan *back filling* lahan bekas penambangan untuk mencegah agar tidak terjadi oksidasi mineral sulfida pada lahan bekas penambangan yang dapat berakibat terjadinya air asam tambang. Sedangkan usaha pengelolaan air asam tambang (*corrective*) yang dilakukan antara lain dengan mengalirkan air asam tambang ke dalam kolam-kolam untuk dikelola serta dipantau secara rutin (harian) untuk mengetahui kualitasnya serta dengan menambahkan kapur (*hydrated lime*) melalui proses netralisasi. Pengecekan kualitas air dilakukan secara terus-menerus selama proses pengelolaan untuk mengetahui kualitas parameter air limbah yang dipantau. Kolam yang mempunyai konsentrasi kekeruhan tinggi melalui proses pengelolaan berupa penambahan koagulan dan flokulan.

Namun, diketahui sejumlah 6 *settling pond* di blok timur tidak menerapkan operasi koagulasi-flokulasi dan netralisasi pH sehingga limpasan air asam tambang yang dilepas ke badan Sungai Palakan tidak memenuhi baku mutu. Selain itu, terdapat bukti yang menunjukkan bahwa di pintu air *settling pond* SP-34 ditemukan papan informasi pemantauan yang tidak diisi oleh petugas. Hal ini merupakan suatu pelanggaran dan bukti kelalaian sejumlah instansi dalam memenuhi tanggung jawabnya sehingga mengakibatkan kegagalan implementasi pengelolaan lingkungan hidup sesuai dengan komitmen dalam dokumen RPL.

D. Karakteristik Air Asam Tambang di Industri Pertambangan Batu Bara

Berikut tiga komponen utama yang menyebabkan terjadinya air asam tambang [5]:

1) Mineral sulfida

Mineral sulfida adalah ikatan antara sulfur dan logam. Pada kondisi terpapar udara bebas, mineral sulfida akan teroksidasi dan terlarut sehingga terbentuk air asam tambang.

2) Oksigen

Oksigen adalah satu komponen yang terdapat di udara. Udara yang terpapar bebas lalu mengenai tanah dan batuan serta tercampur dengan air menyebabkan terbentuknya air asam tambang.

Tabel 6.
Konsentrasi maksimum Fe dan Mn yang dapat ditoleransi oleh tumbuhan air

Tumbuhan	Konsentrasi Fe Maksimum (mg/L)	Konsentrasi Mn Maksimum (mg/L)
Lembang	103	53,90
Eceng gondok	24,40	29,90
Purun tikus	26,92	59,60
Kayu apu	62,80	4,00
Kiambang	47,72	71,34

Tabel 7.
Konsentrasi parameter pencemar air asam tambang pada efluen *constructed wetland*

Parameter	Efisiensi CW (%)	Konsentrasi Influen CW	Konsentrasi Efluen CW	Satuan
pH	51,32	4,48	6,79	-
TSS	92,48	499,67	37,57	mg/L
Fe	85,43	12,20	1,78	mg/L
Mn	95,04	13,80	0,68	mg/L

3) Air

Air juga menjadi komponen penting dalam terbentuknya air asam tambang, karena peningkatan keasaman air yang meningkatkan kelarutan sehingga terbentuk reaksi pembentukan air asam tambang.

Debit total limbah air asam tambang adalah sebesar 0,84 m³/detik [3]. Air asam tambang diantaranya bersumber dari air larian permukaan yang melewati *stockpile*, air limbah dari proses pengolahan hasil tambang, kelebihan air pada proses pencucian batu bara, air yang digunakan untuk mengurangi debu pada proses *crushing* dan penimbunan batu bara, serta limpasan air hujan maupun air tanah yang masuk ke dalam lubang tambang. Karakteristik air asam tambang perusahaan berdasarkan hasil uji yang dilakukan oleh JATAM sesuai dengan parameter baku mutu Kepmen LH Nomor 113 Tahun 2003 tentang Baku Mutu Air Limbah bagi Usaha dan atau Kegiatan Pertambangan Batu Bara dapat dilihat pada Tabel 1.

E. Pengolahan Air Asam Tambang Industri Pertambangan Batu Bara

Industri pertambangan batu bara mengeliminasi pengolahan pendahuluan sehingga terjadi pencemaran di badan air. Oleh karena itu, dilakukan perbaikan efisiensi pengolahan pendahuluan melalui proses koagulasi-flokulasi hingga konsentrasinya mencapai batas kemampuan tumbuhan pada *constructed wetland* untuk mengolahnya. Selanjutnya, dilakukan netralisasi pH pada saluran penghubung antara unit koagulasi-flokulasi dengan unit *settling pond*. Efluen *settling pond* kemudian masuk ke influen *constructed wetland* yang merupakan unit pengolahan lanjutan. Diagram alir pengolahan air asam tambang pada industri pertambangan batu bara ditunjukkan pada Gambar 2.

Konsentrasi Fe dan Mn yang diolah pada unit koagulasi-flokulasi diperoleh dengan cara menyisihkan konsentrasi Fe dan Mn di influen SP dengan konsentrasi Fe dan Mn maksimum yang dapat ditoleransi oleh tumbuhan eceng gondok. Berdasarkan perhitungan tersebut, diperoleh konsentrasi Fe dan Mn yang diolah pada unit koagulasi-flokulasi masing-masing yaitu 40,82 mg/L dan 9,58 mg/L. Koagulan yang digunakan pada unit koagulasi-flokulasi pada industri pertambangan batu bara yaitu tawas. Hubungan

antara konsentrasi logam Fe dan dosis koagulan tercantum pada Gambar 3 [12].

Berdasarkan persamaan pada Gambar 3, diperoleh dosis koagulan untuk menyisihkan 40,82 mg/L logam Fe yaitu sebesar 36,53 mg/L. Adapun, hubungan antara konsentrasi logam Mn dan dosis koagulan tercantum pada Gambar 4 [12].

Berdasarkan persamaan pada Gambar 4, diperoleh dosis koagulan untuk menyisihkan 9,58 mg/L logam Mn yaitu sebesar 24,37 mg/L. Di samping itu, koagulasi-flokulasi dengan dosis koagulan 150 mg/L mampu menurunkan TSS sebesar 61 mg/L. Sehingga, total dosis koagulan untuk menyisihkan logam Fe, Mn dan TSS pada unit koagulasi-flokulasi yaitu sebesar 210,90 mg/L. Kadar koagulan yang digunakan yaitu sebesar 17%, sehingga diperoleh kebutuhan koagulan tawas pada unit koagulasi-flokulasi yaitu sebesar 6.002,41 kg/hari

Setelah diolah pada unit koagulasi-flokulasi, air asam tambang dialirkan ke unit *settling pond* melalui saluran penghubung antar unit. Pada saluran penghubung tersebut, dilakukan penambahan kapur tohor (CaO) untuk menaikkan pH. pH sebelum masuk ke unit *settling pond* direncanakan dinaikkan sebesar 1,5 agar pH efluen *settling pond* memenuhi besaran pH yang mampu ditoleransi oleh tumbuhan eceng gondok di *constructed wetland*. Hubungan antara dosis kapur tohor dengan kenaikan pH air asam tambang tercantum pada Gambar 5 [13].

Berdasarkan persamaan pada Gambar 5, diperoleh dosis kapur tohor yang dibutuhkan untuk menaikkan pH sebesar 1,5 dari 2,01 menjadi 3,51 yaitu 0,34 g/L. Kadar kapur tohor yang digunakan yaitu 90% sehingga kebutuhan kapur tohor untuk menaikkan pH air asam tambang yaitu sebesar 1.809,56 kg/hari. Selanjutnya, air asam tambang diolah pada *settling pond*. Hasil perhitungan konsentrasi parameter pencemar air asam tambang pada efluen *settling pond* tercantum pada Tabel 2.

Selanjutnya air asam tambang diolah pada *constructed wetland*. Vegetasi yang digunakan pada *constructed wetland* umumnya berupa tumbuhan akuatik yang tahan terhadap beban pengolahan yang tinggi dan dapat menjadikan kandungan pada zat pencemar sebagai nutrisi untuk mendukung pertumbuhan [6]. Tumbuhan yang terbukti dapat meremediasi air asam tambang dengan *constructed wetland* serta banyak tumbuh di lokasi studi antara lain lebang (*Typha angustifolia*), eceng gondok (*Eichornia crassipes*), purun tikus (*Eleocharis dulcis*), kiambang (*Salvinia molesta*) dan kayu apu (*Pistacia stratiotes*).

Tumbuhan lebang toleran terhadap pH rendah dan genangan air tinggi sehingga produktivitasnya tinggi. Namun tumbuhan ini memiliki tipe akar rimpang sehingga penyerapan konsentrasi logam Fe dan Mn tidak terlalu tinggi [7]. Eceng gondok mempunyai toleransi tinggi terhadap logam karena mampu membentuk fitokelatin yang merupakan senyawa peptida yang digunakan untuk mengkelat logam dalam jumlah yang besar. Tumbuhan ini memiliki kemampuan biofilter yang didukung oleh kemampuan adsorpsi dan akumulasi yang besar terhadap pencemar [4].

Purun tikus dapat tumbuh dengan baik pada pH < 4 di mana kondisi ini sesuai dengan pH air asam tambang yang rata-rata di bawah 4. Interaksi proses pengendapan, sedimentasi,

adsorpsi, ko-presipitasi, pertukaran kation, fotodegradasi, fitoakumulasi, biodegradasi, aktivitas mikrobial, dan serapan tumbuhan purun tikus dapat meningkatkan pH air asam tambang [8]. Tumbuhan kayu apu memiliki sistem perakarannya yang membentuk filter yang dapat menahan dan meyerap logam pada air asam tambang. Selain itu, kayu apu memiliki tipe akar serabut sehingga dapat menerima pasokan oksigen yang lebih tinggi untuk proses oksidasi dengan bantuan mikroorganisme [9]. Kiambang memiliki laju pertumbuhan yang cepat serta memiliki tipe perakaran yang lebat dan panjang [5]. Efisiensi peningkatan pH dan penyisihan TSS serta logam Fe, Mn dari kelima tumbuhan tersebut terlampir pada Tabel 3.

Pertimbangan pemilihan jenis tumbuhan untuk pengolahan air asam tambang dengan *constructed wetland* dilakukan dengan menganalisis nilai faktor biokonsentrasi (BCF), faktor translokasi (TF) dan konsentrasi serapan maksimum masing-masing tumbuhan tersebut terhadap logam Fe dan Mn. Analisis BCF dilakukan untuk mengetahui tingkat akumulasi logam pada akar dan daun tumbuhan air. Adapun, analisis TF digunakan untuk menghitung proses translokasi logam dari akar ke daun.

$$BCF = \frac{\text{Kandungan logam pada akar dan daun}}{\text{Kandungan logam pada air limbah}}$$

$$TF = \frac{\text{Kandungan logam di daun}}{\text{Kandungan logam di akar}}$$

Hasil kajian nilai BCF dan TF kelima tumbuhan air dapat dilihat pada Tabel 4 dan Tabel 5.

Kapasitas penyerapan logam Fe dan Mn oleh masing-masing tumbuhan diperoleh dari konsentrasi maksimum logam yang dapat diserap oleh tumbuhan yang tidak mengakibatkan terjadinya perubahan fisiologis secara signifikan pada tumbuhan seperti reaksi kematian. Uji *range finding test* dilakukan untuk mendapatkan besarnya konsentrasi maksimum polutan yang memberikan efek pada tumbuhan namun tumbuhan masih dapat bertahap hidup [10]. Kajian konsentrasi maksimum Fe dan Mn yang dapat ditoleransi oleh tumbuhan air tercantum pada Tabel 6.

Berdasarkan kajian mengenai efisiensi penyisihan pencemar, perhitungan faktor biokonsentrasi dan faktor translokasi serta konsentrasi maksimum logam Fe dan Mn yang dapat ditoleransi oleh masing-masing tumbuhan air, maka dipilih tumbuhan eceng gondok (*Eichornia crassipes*). Jenis *constructed wetland* yang digunakan yaitu tipe *single plant* karena kemampuan tumbuh tumbuhan air lebih cepat pada tipe ini sehingga biomassa yang dihasilkan meningkat dan konsentrasi pencemar yang diserap oleh tumbuhan air menjadi lebih tinggi [11]. Adapun berdasarkan hasil kajian yang telah dilakukan, tipe *constructed wetland* yang dipilih yaitu tipe aliran *sub-surface flow* dengan arah aliran horizontal guna mengoptimalkan efisiensi pengolahan.

Fe dan Mn hasil pengolahan SP telah memenuhi batas maksimum konsentrasi logam Fe dan Mn yang dapat ditoleransi oleh tumbuhan eceng gondok. Hasil perhitungan konsentrasi parameter pencemar air asam tambang pada efluen *constructed wetland* tercantum pada Tabel 7.

Berdasarkan data pada Tabel 7, parameter pH, TSS dan logam Fe dan Mn telah memenuhi standar baku mutu

berdasarkan Kepmen LH Nomor 113 Tahun 2003 dan aman untuk dibuang ke badan Sungai Palakan.

Kolam disusun secara seri sejumlah empat kompartemen untuk membagi debit sehingga aliran air asam tambang yang masuk ke dalam kolam dapat merata dan untuk memudahkan proses operasi dan pemeliharaan kolam. Kerapatan tumbuhan eceng gondok pada *constructed wetland* yaitu 4 tumbuhan/m² dengan rata-rata berat basah 20 gr serta berat kering 2,53 gr [14]. Luas permukaan masing-masing kompartemen adalah 2,01 ha. Berdasarkan hasil perhitungan, total kebutuhan tumbuhan untuk seluruh kompartemen yaitu 322.160 tumbuhan. Pemanenan tumbuhan dilakukan satu kali per tahun yaitu pada puncak masa tanam tumbuhan eceng gondok.

Tumbuhan yang dipanen selanjutnya diolah untuk dijadikan bahan bakar padat berupa biobriket. Total berat kering tumbuhan eceng gondok untuk seluruh kompartemen yaitu sebesar 815.064,80 gr. Nilai kalor tumbuhan eceng gondok yaitu 4.803 kal/gr per individu sehingga nilai kalor total tumbuhan eceng gondok pada seluruh kompartemen yaitu sebesar 3.914.756.234,40 kal. Satu buah biobriket diproduksi dari 625 gr berat kering eceng gondok [15]. Sehingga jumlah biobriket yang dapat diproduksi dari sejumlah eceng gondok yang dipanen per tahunnya adalah 1.304,10 biobriket.

IV. KESIMPULAN

Pencemaran air di Sungai Palakan disebabkan oleh pembuangan limbah air asam tambang yang berasal dari operasi industri pertambangan batu bara. Metode yang efektif untuk mengatasi pencemaran adalah dengan melakukan pengolahan air asam tambang menggunakan *constructed wetland*. Untuk mengurangi beban pencemar pada *constructed wetland*, air asam tambang diolah terlebih dahulu pada unit pengolahan pendahuluan dengan melakukan perbaikan efisiensi pengolahan unit koagulasi-flokulasi dan netralisasi pH, kemudian air asam tambang diolah pada *settling pond*. Selanjutnya air asam tambang masuk ke unit *constructed wetland*. Jenis *constructed wetland* yang dipilih yaitu tipe *single plant sub-surface flow* arah aliran horizontal dengan menggunakan tumbuhan lokal yaitu eceng gondok. Total kebutuhan tumbuhan pada *constructed wetland* yaitu sejumlah 322.160 tumbuhan. Penggunaan *constructed wetland* menghasilkan efisiensi pengolahan air asam tambang yang lebih tinggi, di mana kualitas parameter pencemar air asam tambang pada efluen *constructed wetland* telah memenuhi baku mutu yang ditetapkan pada Kepmen LH Nomor 113 Tahun 2003 sehingga aman untuk dibuang ke badan Sungai Palakan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] U. B. L. Utami, H. Susanto, B. Cahyono, "Neutralization acid mine drainage (amd) using NaOH at PT. Jorong Barutama Grestone, Tanah Laut, South Borneo", *Indonesian Journal of Chemical Analysis*, vol. 3, no. 1, pp. 17-21, 2020. doi: 10.20885/ijca.vol3.iss1.art3.
- [2] N. S. Prihatini, dan M. S. Iman, "Pengolahan air asam tambang menggunakan sistem lahan basah buatan: penyisihan mangan (Mn)". *Jurnal Teknik Lingkungan*, vol. 1, no. 1, pp. 16-21, 2015.
- [3] PT. Indo Tambangraya Megah, "Sustainability Report 2021", PT Indo Tambangraya Megah Tbk: Jakarta, 2021.
- [4] F. Hariyanti, "Efektivitas *Subsurface Flow-Wetlands* Dengan Tanaman

- Eceng Gondok Dan Kayu Apu Dalam Menurunkan Kadar COD Dan TSS Pada Limbah Pabrik Saos”, Progam Studi Kesehatan Masyarakat, Universitas Muhammadiyah Semarang, 2016.
- [5] R. A. Saputra, “Studi Literatur Kemampuan Tumbuhan *Salvinia molesta* dan *Salvinia natans* terhadap Penyerapan Fe dan Mn pada pengolahan air asam tambang”, *Jurnal Teknik ITS*, vol. 2, no. 9, 2020. doi: 10.12962/j23373539.v9i2.54696.
- [6] A. F. Rahmani, dan H. Marisa, “Efisiensi penyisihan organik limbah cair industri tahu dengan aliran horizontal subsurface pada *constructed wetland* menggunakan *typha angustifolia*”. *Jurnal Teknik Lingkungan*, vol. 20, no. 1, pp. 78-87, 2014.
- [7] A. Sandrawati, “Pengelolaan Air Asam Tambang Melalui Rawa Buatan Berbasis Bahan In-Situ Di Pertambangan Batu Bara (Studi Kasus di Site Pertambangan Sambarata, PT. Berau Coal, Kabupaten Berau, Provinsi Kalimantan Timur)”, Program Studi Agroteknologi Tanah, Institut Pertanian Bogor, 2012.
- [8] R. Yunus, dan N. S. Prihatini, “Fe and Mn Phytoremediation of acid coal mine drainage using water hyacinth (*eichornia crassipes*) and chinese water chestnut (*eleocharis dulcis*) on the constructed wetland system”. *International Journal of Biosciences*, vol. 12, no.4, pp. 273-282, 2018.
- [9] M. W Saputra, dkk, “Efektivitas Penurunan Fe Dan Mn pada Air Asam Tambang Dengan Tanaman Purun Tikus (*Eleocharis Dulcis*), dan Kayu Apu (*Pistia Stratiotes*) Menggunakan Sistem Lahan Basah Buatan Metode *Batch* Bertingkat”, Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Lambung Mangkurat, 2014.
- [10] M. O. Damanik, dan F. P. Ipung, “*Range Finding Test* (RFT) *cyperus rotundus* l. dan *scirpus grossus* sebagai penelitian pendahuluan dalam pengolahan limbah cair tempe”. *Jurnal Teknik ITS*, vol. 7, no. 1, pp. 161-164, 2018.
- [11] I. Arliyani, V. T. Bieby, M. Sarwoko, “Plant diversity in a constructed wetland for pollutant parameter processing on leachate: a review”. *Journal of Ecological Engineering*, vol. 22, no. 4, pp. 240-255, 2021.
- [12] N. Wityasari, “Penentuan Dosis Pac Pada Pengolahan Air Bersih di IPA Tegal Besar PDAM Jember”, Program Studi Teknik Pertanian, Universitas Jember, 2015.
- [13] M. R. A. F. Assyakiri, R. Hisni, N. Asep, “Kebutuhan dosis kapur tohor dalam penetralan air asam tambang KPL pit 1 timur banko barat PT Bukit Asam”. *Jurnal Ilmiah Multidisiplin Indonesia*, vol. 2, no. 1, pp. 292-301, 2022.
- [14] P. I. Hartanti, T. S. H. Alexander, W. Ruslan, “Pengaruh kerapatan tanaman eceng gondok (*eichornia crassipes*) terhadap penurunan logam chromium pada limbah cair penyamakan kulit”. *Jurnal Sumberdaya Alam dan Lingkungan*, vol. 1, no. 2, pp. 31-37, 2014.
- [15] F. Afriliana, C. Imsiana, “Pembuatan Bahan Bakar Padat Dari Eceng Gondok Hasil Proses Fitoremediasi”, Departemen Teknik Kimia, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2015.