

## PENURUNAN KANDUNGAN SULFAT PADA AIR ASAM TAMBANG MENGUNAKAN REAKTOR BAKTERI PEREDUKSI SULFAT TERSUSPENS

Muchamad Yusron<sup>(1)</sup>, Bibiana W. Lay<sup>(2)</sup>, Anas M. Fauzi<sup>(2)</sup> dan Dwi Andreas Santosa<sup>(2)</sup>

<sup>1)</sup> Balai Penelitian Tanaman Obat dan Aromatik, Bogor,

<sup>2)</sup> Program Studi Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan, Sekolah Pascasarjana,  
Institut Pertanian Bogor

### ABSTRACT

Acid mine drainage is sulfate containing wastewaters caused by mining industry that have negative impact to environmental quality. The use of sulfate reducing microorganisms is a potential way in reducing sulfate. The aim of this research was to study the effectiveness of anaerobic reactor of sulfate reducing bacteria to reduce sulfate and metal content in acid mine drainage. Three isolates of *Desulfovibrio* sp. were tested. Growth of the sulfate reducing bacteria on different environmental conditions was investigated prior to the operation of anaerobic reactor. The reactor was designed with size of 10 cm length, 15 cm width, and 20 cm height. The result showed that the optimum pH of *Desulfovibrio* sp. range between 5-7, and able to reduced sulfate content of about 82-90%. The application of freely suspended sulfate reducing bacteria cell reactor efficiently reduce sulfate and metal content of wastewaters, however operation still need long residence time. With 30 days residence time, sulfate content reduced of about 88-90%, dissolved Fe and Mn reduced of about 97% and pH increased to 7.

*Keywords: Acid mine drainage, reactor, sulfate reducing bacteria, suspended cell system*

### PENDAHULUAN

Salah satu dampak negatif industri pertambangan adalah terbentuknya air asam tambang. Pembukaan bentang lahan saat pengambilan mineral dalam tanah menyebabkan tersingkapnya bahan mineral sulfida ke permukaan tanah, sehingga mengalami oksidasi. Proses oksidasi secara kimia dan biologi tersebut menghasilkan senyawa sulfat dengan tingkat kemasaman yang tinggi, sehingga meningkatkan kelarutan logam-logam berbahaya. Kondisi demikian menyebabkan limbah air asam tambang menyebabkan penurunan kualitas lingkungan dan mengganggu kehidupan organisme.

Untuk mengurangi dampak negatif limbah tersebut, telah banyak dilakukan upaya remediasi baik secara abiotik maupun biologi (Johnson dan Hallberg, 2005). Teknik remediasi abiotik, yang dikenal dengan perlakuan aktif, telah

dikembangkan antara lain dengan cara menambahkan bahan kimia untuk menetralkan sifat asam limbah (Coulton *et al.*, 2003). Beberapa bahan penetralisir yang banyak digunakan antara lain adalah kapur, kalsium oksida, kalsium karbonat, sodium hidroksida, magnesium oksida dan magnesium hidroksida (Johnson dan Hallberg, 2005). Penggunaan bahan kimia tersebut sangat efektif dalam mengolah air asam tambang, tetapi biaya operasionalnya sangat tinggi, serta menghasilkan lumpur limbah yang sangat banyak.

Teknik remediasi lain yang dianggap lebih murah adalah dengan memanfaatkan mikroorganisme untuk menghasilkan dan meningkatkan alkalinitas dan mengimobilisasi logam-logam berbahaya. Bakteri pereduksi sulfat adalah mikroorganisme yang mampu tumbuh dan hidup di lingkungan yang banyak mengandung sulfat, dan memanfaatkan sulfat sebagai terminal akseptor elektron

Penurunan Kandungan Sulfat .....(Yusron dkk)

dan senyawa organik sebagai donor elektron (Moosa *et al.*, 2002). Kelompok bakteri pereduksi sulfat yang banyak ditemukan di alam adalah *Desulfotomaculum* sp. dan *Desulfovibrio* sp.

Habitat pertumbuhan bakteri pereduksi sulfat cukup luas. Selain di lautan, bakteri ini juga ditemukan di lahan sawah dan perairan darat. Mengingat bakteri ini merupakan bakteri anaerob obligat, bakteri pereduksi sulfat lebih banyak ditemukan lingkungan anoksik, terutama di bagian bawah sedimen. Jorgensen (1982) melaporkan bahwa jumlah dan aktivitas bakteri pereduksi sulfat meningkat dengan ketebalan lapisan sedimen. Namun demikian, ada kelompok bakteri pereduksi sulfat mampu tumbuh pada kondisi oksik. Hal ini yang menyebabkan ada keragaman bakteri yang tumbuh dalam sedimen. Risatti *et al.* (1994) mengemukakan bahwa kelompok *Desulfovibrio* sp. lebih dominan di bagian atas sedimen, sedangkan *Desulfotomaculum* sp. banyak ditemukan pada bagian bawah sedimen.

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui efektivitas reaktor bakteri pereduksi sulfat sistem tersuspensi dalam mereduksi sulfat dan mengurangi kandungan logam terlarut dalam limbah air asam tambang.

## BAHAN DAN METODE

### Isolat

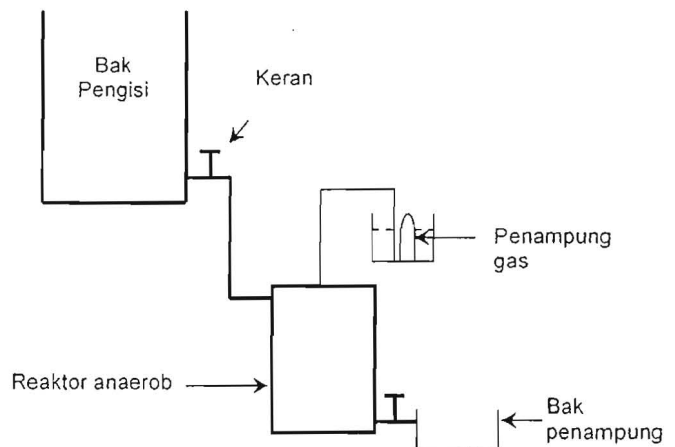
Isolat bakteri pereduksi sulfat yang digunakan dalam penelitian ini adalah ICBB 8815, ICBB 8816 dan ICBB 8818. Ketiga isolat tersebut tergolong *Desulfovibrio* sp. yang diisolasi dari sedimen kolam penampungan air asam tambang pada pertambangan batu bara PT Bukit Asam, Muara Enim, Sumatera Selatan. Isolat tersebut merupakan koleksi bakteri pereduksi sulfat yang dimiliki oleh *Indonesian Center for Biodiversity and Biotechnology* (ICBB), Bogor.

## Pertumbuhan Bakteri Pereduksi Sulfat Pada Variasi pH Lingkungan

Untuk melihat tingkat pertumbuhan bakteri pereduksi sulfat pada kondisi pH yang berbeda, masing-masing 1 mL suspensi mikroba dimasukkan ke dalam tabung ulir yang telah berisi 1/3 bagian media cair steril dengan pH 3, dan secara perlahan-lahan diisi sampai penuh dan ditutup rapat. Dengan cara yang sama dilakukan dengan variasi pH 4, 5, 6, dan 7, dan diinkubasi pada suhu 28 °C. Pengamatan dilakukan terhadap kecepatan pertumbuhan bakteri, kenaikan pH, kemampuan mereduksi sulfat dan produksi sulfida.

## Pengolahan Air Asam Tambang Dengan Reaktor Anaerob Sistem Tersuspensi

Pada kegiatan ini pengolahan air asam tambang akan dilakukan dengan menggunakan reaktor pengolahan pada kondisi anaerob bakteri pereduksi sulfat tersuspensi seperti pada Gambar 1. Reaktor dibuat dari kaca dengan ukuran diameter panjang 10 cm, lebar 15 cm, dan tinggi 20 cm, sehingga total volume kolom 3000 cm<sup>3</sup>. Limbah asam tambang dimasukkan ke dalam kolom bersama-sama dengan ditambahkan nutrisi starter berupa asam laktat sebanyak 10 mL/L limbah dan isolat bakteri pereduksi sulfat yang telah ditumbuhkan.



Gambar 1. Rancangan reaktor pengolahan air asam tambang secara anaerob

Penurunan Kandungan Sulfat .....(Yusron dkk)

Tiga isolat yang digunakan dalam percobaan ini adalah ICBB 8815, ICBB 8816, dan ICBB 8818.

Parameter yang diukur adalah kemampuan bakteri pereduksi sulfat dalam mereduksi sulfat, sulfida yang terbentuk, peningkatan pH limbah, dan kemampuan mereduksi Fe dan Mn terlarut dalam air asam tambang.

**HASIL DAN PEMBAHASAN**  
**Pertumbuhan Bakteri Pereduksi Sulfat Pada Variasi pH Lingkungan**

Kondisi kemasaman media secara nyata mempengaruhi kecepatan tumbuh (Tabel 1). Pertumbuhan bakteri pereduksi sulfat semakin cepat dengan kenaikan pH. Pada pH rendah waktu awal pertumbuhan bakteri lebih dari 8 hari setelah inkubasi, tetapi membutuhkan waktu lebih cepat pada pH tinggi. Isolat ICBB 8815 membutuhkan waktu 11 hari untuk tumbuh pada pH 3, tetapi hanya butuh waktu 3 hari untuk tumbuh pada pH 7. Pada pH di atas 6 dan 7, ICBB 8818 mampu tumbuh 1 hari setelah inkubasi.

Pertumbuhan dan aktivitas bakteri pereduksi sulfat sangat dipengaruhi oleh pH lingkungan. Pengaruh pH terhadap pertumbuhan bakteri dapat melalui dua cara, yakni melalui (1) fungsi sistem enzimatis dalam sel bakteri dan (2) pembentukan energi dalam sel. Perubahan pH secara langsung mempengaruhi struktur enzim dan protein lain dalam sel, karena aktivitas fisiologis intraselular selalu berada dalam kondisi mendekati netral. Oleh karena itu, sel bakteri perlu melakukan penyesuaian apabila kondisi lingkungan di luar sel terlalu masam atau terlalu basa.

Pengaruh pH terhadap pertumbuhan bakteri dapat melalui pembentukan energi dalam sel. Kondisi pH yang terlalu masam atau terlalu basa akan menghambat pembentukan ATP, sedangkan kondisi pH netral pembentukan ATP berjalan lebih cepat (Garland, 1977; Mitchell, 1961).

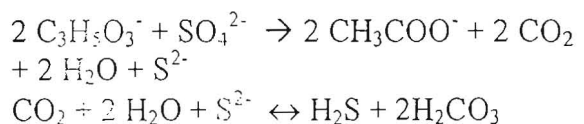
ATP adalah protein penghasil energi yang dipergunakan dalam pertumbuhan sel. Kondisi demikian yang menyebabkan pada pH rendah waktu tumbuh bakteri lebih lama dibandingkan dengan pH mendekati netral. Hal ini sejalan dengan hasil beberapa penelitian lain (Elliot *et al.*, 1998; Johnson *et al.*, 1993; Kolmert dan Johnson, 2001). Untuk dapat tumbuh dan berkembang dengan baik bakteri pereduksi sulfat membutuhkan kondisi kemasaman media yang optimal pada pH 5-6 (Elliot *et al.*, 1998; Bratcova *et al.*, 2002). Pada kondisi kemasaman di bawah atau di atas nilai pH tersebut pertumbuhan dan aktivitas bakteri pereduksi sulfat akan terhambat.

Tabel 1. Pengaruh pH media terhadap waktu tumbuh bakteri pereduksi sulfat, konsentrasi sulfat 1000 mg/L

Isolat	pH 3	pH 4	pH 5			pH 6	pH 7
			hari				
ICBB 8815	11	6	3	3	3	3	3
ICBB 8816	10	5	4	3	3	3	3
ICBB 8818	8	4	3	1	1	1	1

Perbedaan pertumbuhan sel bakteri pada masing-masing nilai pH berdampak langsung pada kemampuan bakteri mereduksi sulfat dan jumlah sulfat yang tereduksi. Kemampuan bakteri dalam mereduksi sulfat meningkat dengan meningkatnya pH media (Tabel 2). Pada media dengan pH awal 3, efisiensi bakteri dalam mereduksi sulfat adalah 83,16%, 83,36% dan 82,17%, berturut-turut untuk ICBB 8815, ICBB 8816 dan ICBB 8818, sedang pada pH 7 reduksi sulfat mencapai 89,59%, 89,39% dan 90,80%. Isolat ICBB 8818 memperlihatkan kemampuan mereduksi sulfat yang paling menonjol dibandingkan dengan ketiga isolat lainnya.

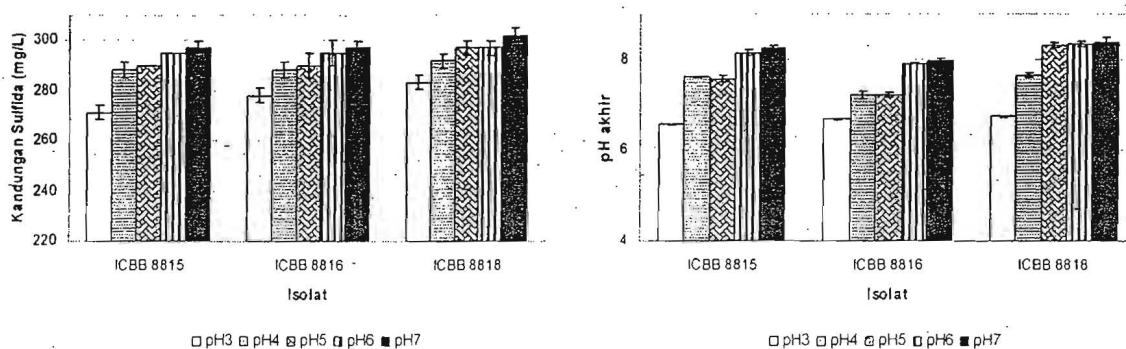
Dengan adanya proses reduksi sulfat terbentuk sulfida, seperti reaksi kimia berikut :



Penurunan Kandungan Sulfat .....(Yusron dkk)

**Tabel 2.** Pengaruh pH terhadap efisiensi bakteri dalam mereduksi sulfat

pH awal	Isolat					
	ICBB 8815		ICBB 8816		ICBB 8818	
	Sisa Sulfat (mg/L)	% Reduksi	Sisa Sulfat (mg/L)	% Reduksi	Sisa Sulfat (mg/L)	% Reduksi
pH3	168,38	83,16	166,38	83,36	148,29	85,17
pH4	122,18	87,78	126,19	87,38	110,13	88,90
pH5	116,16	88,38	120,17	87,98	98,08	90,19
pH6	108,12	89,18	112,14	88,79	92,05	90,80
pH7	104,10	89,59	106,11	89,39	92,05	90,80



**Gambar 2.** Pengaruh pH media terhadap sulfida yang terbentuk (Kiri) dan nilai pH (Kanan) pada akhir percobaan.

Oleh karena itu penurunan konsentrasi sulfat diikuti dengan peningkatan konsentrasi sulfida, seperti disajikan pada Gambar 2. Total sulfida yang terbentuk meningkat dengan peningkatan pH larutan. Pada akhir pengamatan, total sulfida yang terbentuk pada isolat ICBB 8818 sebesar 283,12 mg/L, 291,67 mg/L, 296,80 mg/L, 296,80 mg/L dan 301,93 mg/L berturut-turut untuk pH 3, 4, 5, 6 dan 7. Hal ini sejalan dengan persentase reduksi sulfat, dimana makin tinggi pH larutan, makin banyak sulfat yang tereduksi (Tabel 2).

Penurunan kandungan sulfat berakibat langsung pada kenaikan pH pada akhir percobaan, seperti yang ditampilkan pada Gambar 2. Pada pH awal 4, nilai pH akhir meningkat menjadi 7,60, 7,22 dan Penurunan Kandungan Sulfat .....

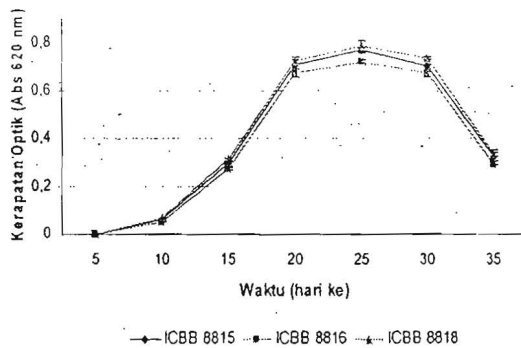
7,65, masing-masing untuk isolat ICBB 8815, ICBB 8816 dan ICBB 8818. Kenaikan nilai pH tersebut berkaitan dengan proses reduksi  $SO_4^{2-}$  menjadi  $H_2S$ .  $H_2SO_4$  yang merupakan asam kuat berkurang dan berubah menjadi asam lemah. Disamping itu, bikarbonat yang terbentuk merupakan senyawa yang bersifat alkalin, dan mengikat ion  $H^+$  yang merupakan sumber kemasaman limbah.

**Pertumbuhan Isolat Bakteri Pereduksi Sulfat dalam Reaktor Anaerob Sistem Tersuspensi**

Pertumbuhan isolat ICBB 8815, ICBB 8816 dan ICBB 8818 dalam reaktor d disajikan pada Gambar 3. Pertumbuhan bakteri pereduksi sulfat diamati secara .....

(Yusron dkk)

turbidimetri. Secara umum isolat ICBB 8818 menunjukkan pertumbuhan yang lebih baik, diikuti dengan isolat ICBB 8815 dan ICBB 8816. Pola pertumbuhan ketiga isolat menunjukkan pola yang hampir sama. Pada awal pertumbuhannya, ketiga isolat tidak menunjukkan perbedaan, tetapi pada hari ke 10 dimana pertumbuhan bakteri memasuki fase eksponensial, ketiga isolat menunjukkan laju pertumbuhan yang berbeda. Ketiga isolat yang diuji menunjukkan pertumbuhan eksponensial antara hari ke 10 – 20 setelah inkubasi, sedang fase stasionari terjadi antara hari ke 20 – 30 setelah inkubasi. Pada puncak pertumbuhannya, yakni pada hari ke 25, kerapatan optik tertinggi adalah 0,77; 0,72 dan 0,79 berturut-turut untuk isolat ICBB 8815, ICBB 8816 dan ICBB 8818. Populasi bakteri mulai menurun setelah 25 hari. Pada akhir percobaan, 35 hari setelah inkubasi, kerapatan optik hanya berkisar antara 0,29 dan 0,34. Dari data tersebut terlihat bahwa fase kematian bakteri mulai terjadi 30 hari setelah inkubasi.



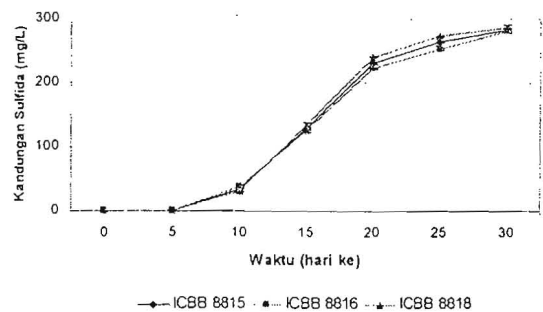
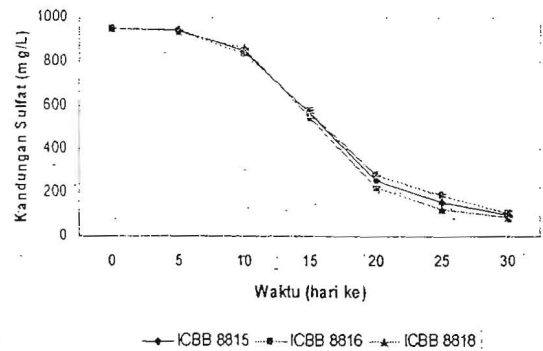
**Gambar 3.** Pola pertumbuhan tiga isolat bakteri pereduksi sulfat pada reaktor anaerob sistem tersuspensi

**Kemampuan Isolat Bakteri Pereduksi Sulfat mereduksi Sulfat dan Logam Terlarut pada Reaktor Anaerob Sistem Tersuspensi**

Penurunan konsentrasi sulfat limbah air asam tambang pada reaktor bakteri pereduksi sulfat ditampilkan pada Gambar 4. Efisiensi reduksi sulfat untuk

isolat ICBB 8815, ICBB 8816 dan ICBB 8818 berturut-turut adalah 89,60%, 88,21% dan 90,44%. Efisiensi reduksi sulfat tersebut terjadi dalam waktu inkubasi 30 hari.

Pada awal inkubasi, proses reduksi sulfat berjalan lambat. Proses reduksi sulfat berjalan cepat pada inkubasi hari ke 5 sampai 20, kemudian melandai pada hari ke 20 – 30. Kecepatan laju reduksi ini sejalan dengan perkembangan populasi bakteri. Populasi bakteri berkembang dengan cepat pada hari ke 10-20, seperti terlihat pada grafik pertumbuhan bakteri pereduksi sulfat (Gambar 3). Pada saat populasi bakteri berkembang dengan cepat, jumlah sulfat yang tereduksi semakin tinggi. Pada 20 hari setelah inkubasi, perkembangan bakteri memasuki fase stasionari dimana perkembangan sel mulai terhenti. Kondisi ini menyebabkan jumlah sulfat yang tereduksi sedikit.

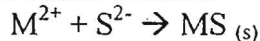


**Gambar 4.** Penurunan konsentrasi sulfat (Atas) dan peningkatan sulfida (Bawah) pada limbah air asam tambang pada reaktor bakteri pereduksi sulfat tersuspensi

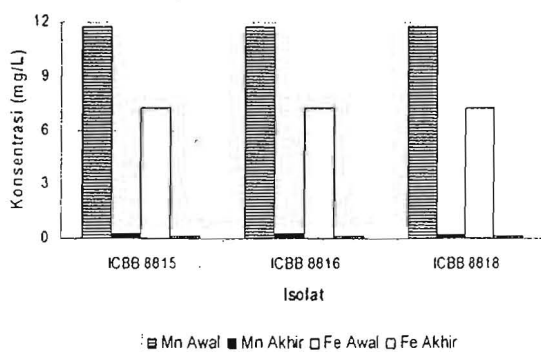
Penurunan Kandungan Sulfat .....(Yusron dkk)

Penurunan sulfat tersebut diikuti dengan peningkatan sulfida (Gambar 4). Peningkatan sulfida sejalan dengan penurunan sulfat. Pembentukan sulfida mulai terukur setelah hari ke 5, dan menunjukkan peningkatan yang nyata antara hari ke 10 dan 20 saat pertumbuhan bakteri pereduksi sulfat berada pada fase eksponensial. Penurunan kandungan sulfat dan peningkatan sulfida menyebabkan pH limbah meningkat. Pada akhir percobaan, pH limbah mencapai 7.

Reaktor bakteri pereduksi sulfat juga mampu menurunkan logam terlarut secara signifikan (Gambar 5). Logam tersebut bereaksi dengan  $S^{2-}$  membentuk logam sulfida yang tidak larut, seperti reaksi berikut:



Pada penelitian ini logam terlarut yang diukur adalah Fe dan Mn karena berdasarkan hasil analisa limbah air asam tambang, konsentrasi yang terlarut kedua logam ini cukup tinggi, yakni 6,99-7,22 mg/L dan 11,31-11,77 mg/L. Pada akhir inkubasi selama 30 hari, total terlarut dari kedua logam ini adalah 0,15-0,17 mg/L dan 0,23-0,28 mg/L, masing-masing untuk Fe dan Mn. Logam tersebut bereaksi dengan  $S^{2-}$  membentuk logam sulfida yang tidak larut (mengendap).



**Gambar 5.** Penurunan konsentrasi Fe dan Mn terlarut limbah air asam tambang pada reaktor bakteri pereduksi sulfat tersuspensi.

Hasil ini memperlihatkan bahwa penggunaan reaktor bakteri pereduksi sulfat tersuspensi secara nyata mampu

mengurangi kandungan sulfat dan logam terlarut dalam limbah air asam tambang dengan tingkat efisiensi antara 88-90%, dan reduksi logam terlarut sekitar 97%, serta mampu meningkatkan pH dari sekitar 3 menjadi 7. Namun demikian, untuk mendapatkan tingkat efisiensi tersebut diperlukan waktu yang cukup lama, yakni sekitar 30 hari. Sedangkan untuk memperoleh kandungan sulfat yang diperbolehkan (400 mg  $SO_4^{2-}/L$ ) diperlukan waktu lebih dari 21 hari. Hal ini dianggap terlalu lama untuk pengolahan limbah di lapang. Disamping itu, dengan sistem sel bakteri tersuspensi, masih ada kemungkinan terjadinya bakteri yang terbuang (*wash out*) ke lingkungan bersama-sama dengan pembuangan air limbah. Oleh karena itu, untuk mempertahankan jumlah populasi bakteri yang optimal, diperlukan penambahan bakteri ke dalam reaktor.

## KESIMPULAN

1. Pertumbuhan bakteri pereduksi sulfat dipengaruhi oleh kondisi pH lingkungan. pH optimal untuk pertumbuhan bakteri pereduksi sulfat antara 5-7.
2. Penggunaan reaktor bakteri pereduksi sulfat tersuspensi dengan waktu 30 hari mampu mengurangi kandungan sulfat sebesar 88-90%, mengurangi Mn dan Fe terlarut sekitar 97% dan meningkatkan pH dari 3 menjadi 7.

## DAFTAR PUSTAKA

- Bractova, S., S. Groudev and P. Georgiev. 2002. The effect of some essential environmental factors on microbial dissimilatory sulphate reduction. Annual of the University of Mining and Geology St Ivan Ritski, Vol 44-45, Part II, Mining and Mineral processing. pp. 123-127.
- Coulton R., C. Bullen, C. Hallet, J. Wright and C. Marsden. 2003. Wheal Jane mine water active treatment plant-design,

Penurunan Kandungan Sulfat .....(Yusron dkk)

- construction and operation. *Land Contamination and Reclamation* 11:245-252.
- Elliott, P., S. Ragusa and D. Catcheside. 1998. Growth of sulfate-reducing bacteria under acidic conditions in and upflow anaerobic bioreactor as a treatment system for acid mine drainage. *Water Resources* 32(12):3724-3730.
- Garland, P.B. 1977. Energy transduction in microbial systems. *Symposium Society of Genetic Microbiology* 27:1.
- Johnson, D.B. and K.B. Hallberg. 2005. Acid mine drainage remediation options: a review. *Science of the Total Environment* 338: 3-14. [www.elsevier.com/locate/scitotenv](http://www.elsevier.com/locate/scitotenv). (22 Desember 2006)
- Johnson, D.B., M.A. Ghauri and S. McGinness. 1993. Biogeochemical cycling of iron and sulphur in leaching environments. *FEMS Microbiology Review* 11:63-70.
- Jorgensen, B.B. 1982.- Mineralization of organic matter in sea bed: the role of sulphate reduction. *Nature* 296:643-645.
- Kolmert, A. dan D.B. Johnson. 2001. Remediation of acid waste waters using immobilised, acidophilic sulphate-reducing bacteria. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. 76:836-843.
- Mitchell, P. 1961. Coupling of phosphorylation to electron and hydrogen transfer by a chemiosmotic type of mechanism. *Nature* 191:144.
- Moosa, S., M. Nemati and S.T.L. Harrison. 2002. A kinetic study on aerobic reduction of sulphate. Part I: Effect of sulphate concentration. *Chemical and Engineering Science* 57:2773-2780.
- Risatti, J.B., W.C. Capman and D.A. Stahl. 1994. Community structure of a microbial mat: the phylogenetic dimension. *Proceeding of National Academy Science, USA*, 10173-10177.