

PENGHILANGAN GAS H₂S DENGAN TEKNIK BIOFILTER MENGGUNAKAN BAHAN PENGISI KOMPOS DAN ARANG AKTIF

H₂S GAS REMOVAL BY BIOFILTER USING COMPOST AND ACTIVATED CARBON AS PACKING MATERIALS

Mohamad Yani, Purwoko, dan Ahnur Wahyuni

Departemen Teknologi Industri Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor
Kampus IPB Darmaga P.O.Box 220, Bogor 16002
Email : mohyani@ipb.ac.id

ABSTRACT

The removal characteristics of hydrogen sulfide (H₂S) by organic (compost) and inorganic (granular activated carbon) carriers were studied at a laboratory scale. The compost, activated carbon and mix of them with the ratio of 1:1 were evaluated as packing materials of packed tower deodorization apparatus (biofilter) from the view points of biological removal characteristics of H₂S and some physical properties. The removal rate of H₂S by compost, activated carbon and mix of them (1:1) in non-biological treatment were 0.22, 0.37, and 0.88 g-S.kg-dry-material⁻¹ respectively. However, the maximum removal rates of H₂S by biological treatment were 11.85, 14.66, and 20.49 g-S. kg dry-material⁻¹ respectively. The removal rate of H₂S from all packing materials after inoculated with mixed culture of *Thiobacillus sp.* was increased due to biological oxidation by *Thiobacillus sp.* The mixed of compost and activated carbon showed the best result to remove H₂S from contaminated air.

Keywords : Biofilter, H₂S, *Thiobacillus sp.*, compost, activated carbon.

PENDAHULUAN

Pencemaran udara merupakan gabungan dari cemaran gas yang dikeluarkan dari kegiatan alami dan antropogenik. Kegiatan manusia yang memberikan pengaruh nyata terhadap pencemaran udara terutama kegiatan pembakaran bahan bakar, transportasi dan industri. Kegiatan industri terutama industri besar seperti pabrik pulp dan kertas merupakan sumber pencemar udara. Emisi gas dari industri pulp dan kertas yang harus dilaporkan adalah partikel, TRS (*Total Reduced Sulfur*), SO₂, NO₂, dan Cl₂. Baku mutu emisi gas TRS dari tungku *recovery* dan digester adalah 10 ppm, sedangkan dari tanur berputar dan tangki pelarutan adalah 28 ppm (KEP. No. 13/MENLH/3/1995). Hidrogen sulfida merupakan gas yang sangat toksik, pada konsentrasi yang sangat rendah 0,002 ppm sudah dapat tercium, dan pada konsentrasi yang sangat tinggi (> 20 ppm) dapat menyebabkan kematian dalam 2 - 3 menit.

Penanganan emisi gas H₂S maupun TRS secara fisiko-kimia biasanya dilakukan dengan penerapan teknik absorpsi/adsorpsi atau *Flue Gas Desulfurization* (FGD). Teknik FGD, walaupun relatif cepat, namun memerlukan biaya investasi dan operasional yang tinggi. Alternatif lain adalah menggunakan biofilter. Pengolahan gas dengan teknik biofilter dilaporkan relatif murah, efektif, mampu bertahan lama, dan mengubah gas berbahaya menjadi tidak berbahaya atau hilang. Biofilter merupakan salah satu metode dalam mengatasi permasalahan polusi udara dengan memanfaatkan bantuan mikroba (Ottengraf, 1986; Shoda, 1991; Yani, 1999). Metode ini lebih efektif dan efisien bila dibandingkan dengan pengolahan gas secara kimia dan fisika.

Bahan pengisi dari biofilter dapat berupa senyawa organik maupun anorganik. Kompos merupakan salah satu bahan pengisi yang dapat digunakan dalam biofilter. Kompos mengandung bahan organik yang diperlukan oleh mikroba yang digunakan agar dapat tumbuh (Webster *et al.*, 1997). Bahan anorganik yang banyak digunakan sebagai bahan pengisi dalam biofilter adalah arang aktif. Arang aktif memperlihatkan nilai penyerapan gas terbaik bila dibandingkan dengan bahan anorganik lainnya (Lee dan Shoda, 1989).

Penghilangan H₂S memerlukan kultur bakteri yang dapat mendegradasi senyawa ini. Salah satu kultur bakteri yang biasa digunakan untuk mengoksidasi senyawa sulfur adalah *Thiobacillus sp.* Spesies ini memiliki kemampuan untuk mengoksidasi H₂S menjadi sulfur elemental dan senyawa sulfat (Cho *et al.*, 1993) dan dapat bertahan hidup pada pH mencapai 2 (Edmonds, 1978).

Tujuan penelitian ini adalah menentukan kapasitas penyerapan fisik dan biologis dari bahan pengisi biofilter yang digunakan dengan penambahan kultur *Thiobacillus sp.*

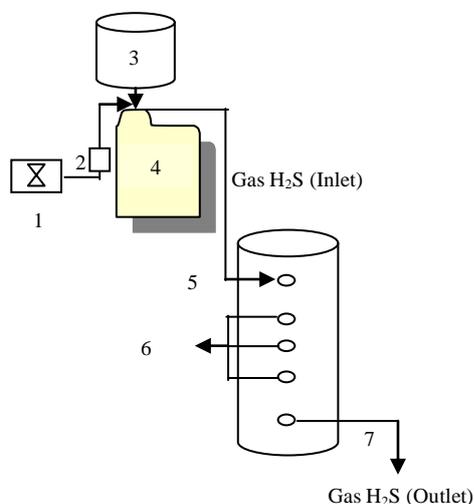
METODE PENELITIAN

Perancangan Kolom Biofilter dan Gas H₂S

Kolom biofilter ini terbuat dari pipa PVC, panjang 60 cm dan diameter 7,5 cm. Jarak antara lubang inlet dan outlet adalah 50 cm. Kolom dibuat dalam dua bentuk untuk melakukan pengujian secara fisik dan biologis. Pada kolom pengujian fisik, lubang pengeluaran dibuat lima buah dengan jarak 10 cm antara masing-masing lubang.

Pengujian secara biologis dengan penambahan kultur *Thiobacillus sp.* dilakukan pada tiga kolom

dimana masing-masing kolom dilengkapi dengan dua buah lubang, sebagai inlet dan outlet. Masing-masing kolom biofilter dilengkapi dengan tiga lubang pada bagian tengah untuk pengambilan contoh bahan pengisi (Gambar 1). Saluran inlet kolom biofilter dihubungkan dengan gas H₂S sintetik yang dibuat dari reaksi antara Na₂S.9H₂O dan HCl dengan laju alir dan konsentrasi yang bervariasi untuk mendapatkan variasi konsentrasi pada masuk-kannya gas H₂S.



Gambar 1. Diagram Kolom biofilter skala laboratorium.

Ket: 1. Aerator; 2. Speed control; 3. HCl; 4. Na₂S; 5. Lubang inlet; 6. Lubang pengamatan; 7. Lubang outlet.

Gas H₂S diukur konsentrasinya dengan menggunakan larutan Zn-Acetate sebagai larutan penangkap kemudian direaksikan dengan FeCl₃ dan larutan N,N-Dimethyl-1,4-Phenylene Diamonium Diklorida. Larutan tersebut kemudian diukur kekeruhannya dengan menggunakan Spektrofotometer pada panjang gelombang 670 nm. Nilai absorbansi kemudian dibandingkan dengan kurva standar.

Persiapan Bahan Pengisi

Bahan pengisi yang digunakan adalah kompos, arang aktif (GAC) dan campuran antara keduanya dengan perbandingan 1:1. Kompos yang digunakan merupakan kompos komersial (dari kotoran sapi) untuk pupuk tanaman. Bahan pengisi yang akan digunakan terlebih dahulu dilakukan analisa untuk mengetahui karakteristik bahan yang digunakan berupa kadar air, kadar organik total, kadar nitrogen, serta kadar sulfida. Tahapan ini dilakukan untuk mengetahui daya dukung bahan pengisi yang akan digunakan sebagai media perkembangan mikroorganisme.

Pembuatan Inokulum

Mikroba (*Thiobacillus sp.*) yang digunakan dikembangkan pada media sulfur (Tabel 1) sebanyak 10% (v/v) berdasarkan volume kamba media yang digunakan.

Tabel 1. Komposisi media sulfur

Komposisi	Jumlah (g/l)
KH ₂ PO ₄	3
MgSO ₄ .7H ₂ O	0,5
(NH ₄) ₂ SO ₄	0,3
CaCl ₂	0,25
FeCl ₃ .6H ₂ O	0,02

Sumber: Atlas (1993).

Pengamatan

Pengamatan pada masing-masing kolom berupa konsentrasi gas H₂S yang masuk (*inlet*) dan gas keluar (*outlet*) yang dilakukan setiap hari. Pengamatan lain yang dilakukan adalah pengukuran terhadap kadar air, pH, aktivitas mikroorganisme dan kandungan sulfat. Pengamatan ini dilakukan setiap tiga hari sekali. Pengukuran kandungan sulfida bahan pengisi dilakukan pada awal dan akhir pengoperasian.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Bahan Pengisi

Kompos memiliki kadar air, bahan organik total serta kandungan nitrogen yang paling tinggi bila dibandingkan dengan bahan lainnya (Tabel 2). Hal ini menunjukkan bahwa kompos merupakan salah satu bahan pengisi yang baik digunakan pada biofilter. Kompos juga mengandung unsur hara (sumber C dan N) bagi mikroorganisme.

Tabel 2. Karakteristik Bahan Pengisi

Karakteristik Kompos	Arang aktif	Campuran arang aktif dan kompos (1:1)
Kadar Air (%)	49,5	16
Kadar Bahan Organik Total (%)	35	24
Kadar Nitrogen (%)	1	0,32
Kandungan Sulfida (mgS/kg bahan)	0	0

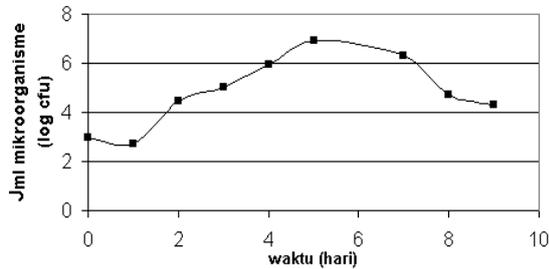
Bahan pengisi lainnya yaitu arang aktif dan campuran arang aktif dengan kompos (1:1), memiliki kadar air yang rendah. Dengan kadar air yang rendah ini, sangat sedikit mikroorganisme yang dapat hidup pada bahan tersebut. Oleh karena itu, penambahan air sangat diperlukan pada kedua bahan tersebut agar berada pada kisaran 30-60% (Ottengraf, 1987; Yani, 1999).

Kultur Bakteri

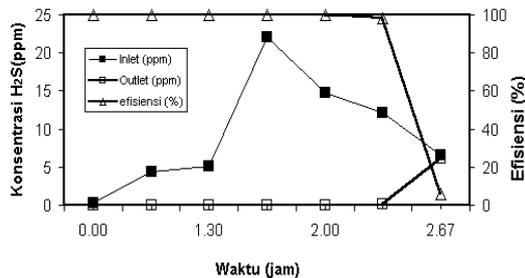
Kultur bakteri selama propagasi dihitung jumlah selnya sehingga dapat diketahui kapan fase logaritmik terjadi. Fase logaritmik merupakan suatu

fase dari perkembangan mikroba dimana pada fase ini jumlah sel meningkat seiring dengan pertambahan waktu (Lay dan Sugyohastowo, 1989).

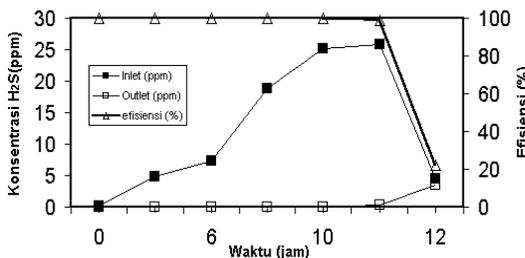
Fase logaritmik dari kultur yang digunakan adalah pada hari ke-1 sampai hari ke-5 (Gambar 2). Hal ini menunjukkan bahwa kultur bakteri ini dapat dipersiapkan dalam lima hari sebelum diinokulasikan ke dalam biofilter.



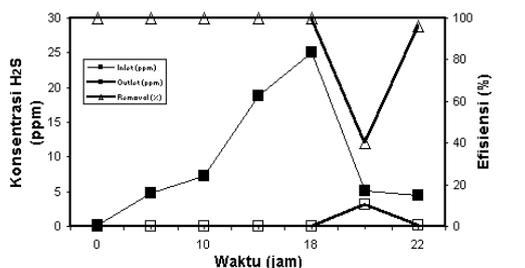
Gambar 2. Kurva pertumbuhan *Thiobacillus sp*



Gambar 3. Penyerapan H₂S secara fisik-kimia oleh bahan pengisi kompos



Gambar 4. Penyerapan H₂S secara fisik kimia oleh bahan pengisi arang aktif



Gambar 5. Penyerapan H₂S secara fisik-kimia oleh campuran kompos dan arang aktif (1:1)

Penyerapan gas H₂S secara fisik-kimia

Pengujian secara fisik-kimia dimaksudkan untuk mengukur kemampuan bahan pengisi dalam penyerapan gas H₂S, sekaligus sebagai kontrol

pengamatan. Sebelum dilakukan pengujian fisik-kimia ini, pada bahan pengisi campuran dan arang aktif diberi perlakuan penambahan air hingga kadar air pada ke-tiga kolom berada pada kisaran yang sama, sekitar 50%. Gas H₂S dialirkan ke dalam kolom dengan konsentrasi 0 - 26 ppm yang akan diserap secara fisik-kimia oleh bahan pengisi kolom hingga jenuh yang ditandai dengan terukurnya gas H₂S pada outlet (Gambar 3, 4 dan 5). Lamanya waktu penyerapan gas hingga jenuh, diperlihatkan dengan penurunan efisiensinya, dan perhitungan kemampuan penyerapan fisik-kimia sampai jenuh disajikan pada Tabel 3. Terlihat pada tabel tersebut bahwa bahan campuran memiliki waktu jenuh yang paling lama (22 jam) bila dibandingkan dengan bahan lainnya (Gambar 5).

Tabel 3. Kemampuan penyerapan sulfur secara fisik-kimia dari ketiga bahan pengisi

Jenis bahan pengisi	Penyerapan sulfur (g-S/kg bahan kering)	Rentang konsentrasi (ppm)	Lama operasi (jam)
Kompos	0,22	0 - 22	2,6
Arang Aktif	0,37	0 - 26	11
Campuran (1:1)	0,87	0 - 25	22

Campuran antara arang aktif dengan kompos (1:1) memiliki kemampuan yang paling besar untuk menyerap sulfur (Tabel 3) yang masuk ke dalam kolom bila dibandingkan dengan kedua bahan pengisi lainnya, lalu diikuti oleh arang aktif dan kompos. Bahan pengisi campuran memiliki daya adsorpsi gas yang besar karena di dalamnya terkandung arang aktif dan kompos. Arang aktif merupakan bahan yang memiliki daya adsorpsi yang tinggi. Namun pada pengujian fisik arang aktif sendiri memberikan hasil yang rendah bila dibandingkan dengan campuran. Hal ini dapat dipengaruhi oleh penambahan air pada arang aktif yang menyebabkan arang aktif telah jenuh oleh air sehingga tidak dapat melakukan penyerapan gas secara baik.

Kompos memiliki kemampuan penyerapan yang paling rendah diantara ketiga bahan pengisi yang digunakan. Hal ini diduga karena kompos memiliki porositas serta kepadatan dalam kolom yang rendah bila dibandingkan dengan kedua bahan lainnya, sehingga hanya sedikit gas yang dapat tertahan dengan waktu yang singkat.

Penyerapan gas H₂S pada biofilter secara biologis dengan penambahan kultur bakteri *Thiobacillus sp*.

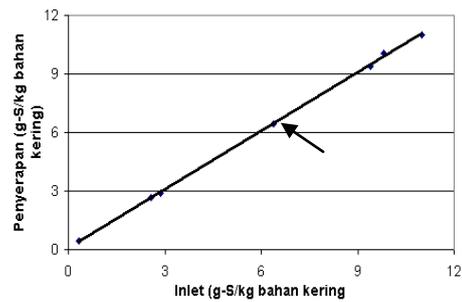
Prinsip dari biofilter adalah menyaring gas-gas yang dialirkan ke dalamnya, dimana di dalam biofilter tersebut terdapat bahan penyaring/bahan pengisi yang berfungsi sebagai tempat hidup bagi kultur mikroba yang ditumbuhkan. Bahan pengisi/penyaring juga berfungsi dalam membantu

penyerapan gas secara fisik-kimia hingga jenuh sebelum digunakan oleh mikroba. Mikroba yang digunakan tersebut kemudian akan terimobilisasi pada bahan pengisi dan akan membentuk lapisan tipis (*biofilm* atau *biolayer*). *Biolayer* yang terbentuk oleh mikroba ini, maka akan menyerap gas polutan yang masuk sehingga dapat dioksidasikan dan diuraikan oleh mikroba tersebut.

Penyerapan gas H₂S pada kolom biofilter dengan bahan pengisi kompos yang diinokulasi dengan *Thiobacillus sp.*

Pada awal pemasukan kultur terlihat bahwa pH dari bahan cenderung tetap antara 3,5 – 4,5 dengan jumlah mikroba yang mengalami penurunan pada awal namun akhirnya mengalami peningkatan (Gambar 6) dan nilai kadar air yang kisarannya tidak terlalu jauh (54 – 58%). Hal ini menunjukkan bahwa kultur yang ada dalam bahan telah mengalami fase adaptasi namun karena jumlah bahan pengisi yang digunakan sedikit maka kondisi bahan untuk mencapai kejenuhan cepat terjadi.

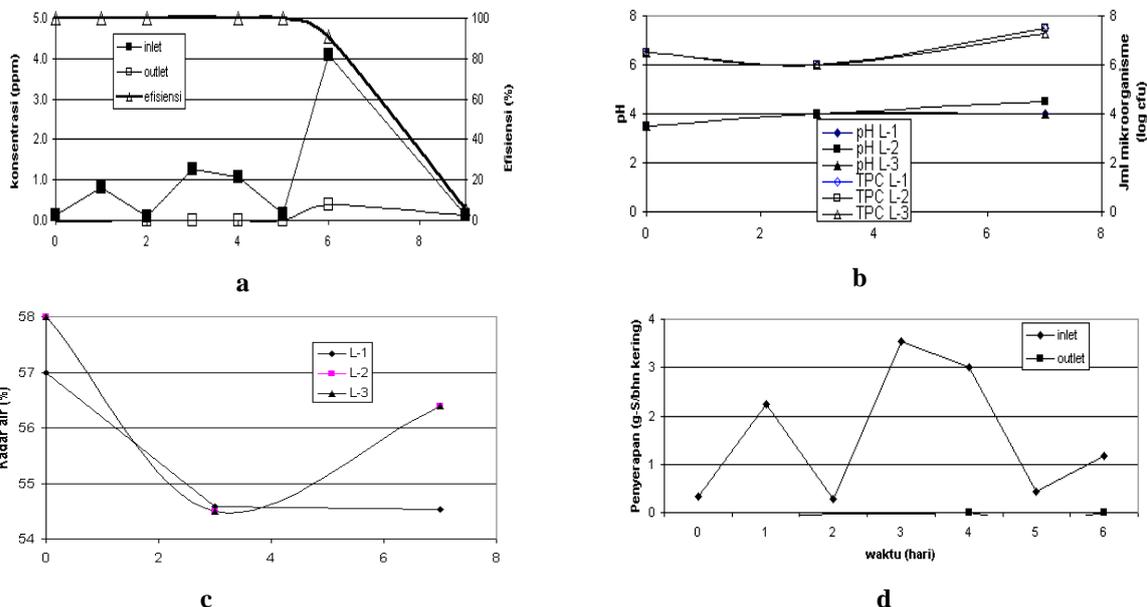
Kolom biofilter dengan bahan pengisi kompos dan kultur *Thiobacillus sp.* dapat menyerap dan mengubah H₂S yang dilewatkan selama 6 hari (Gambar 6d.) dengan jumlah sulfur maksimum yang dapat diserap 11,49 g-S/kg kompos kering (Gambar 7). Efisiensi kolom dapat bertahan di atas 95% pada beban sulfur yang dimasukkan ke dalam kolom sebesar 6,4 g-S/kg kompos kering (Gambar 7, panah). Hal ini disebabkan karena selain jumlah bahan pengisi yang kurang juga karena kompos dapat menimbulkan masalah berupa *agging effects* pada penggunaan yang terlalu lama.



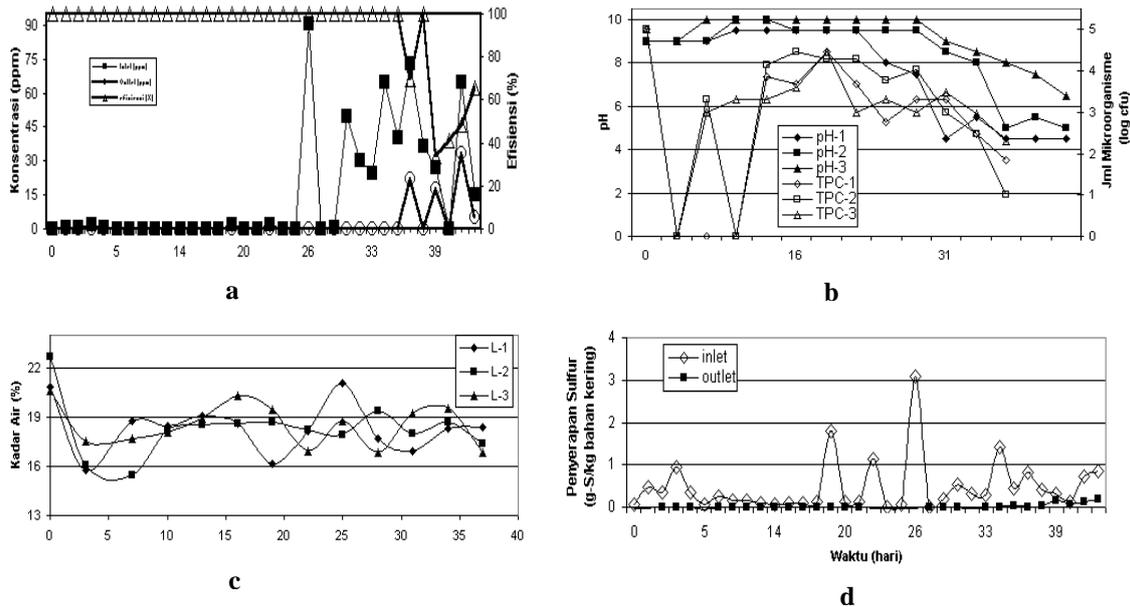
Gambar 7. Penyerapan maksimum sulfur kolom biofilter dengan bahan pengisi kompos dan kultur *Thiobacillus sp.*

Penyerapan gas H₂S pada kolom biofilter dengan bahan pengisi arang aktif yang diinokulasi dengan *Thiobacillus sp.*

Pada awal pemasukan kultur terlihat bahwa pH dari bahan cenderung basa dengan nilai 10 dan jumlah mikroba yang mengalami penurunan yang sangat drastis bahkan hampir mencapai kematian. Hal ini disebabkan karena kultur yang digunakan melakukan penyesuaian dengan lingkungan barunya dimana di dalamnya terdapat racun yang dapat membunuh mikroba yang ada. Pada waktu pengoperasian kolom mencapai hari ke 13 terlihat bahwa jumlah mikroba yang ada mengalami kenaikan jumlah yang disertai dengan penurunan pH bahan serta kadar air yang cenderung konstan. Hal ini menunjukkan bahwa pada masa ini kultur yang digunakan telah melalui masa adaptasi sehingga dapat mengoksidasi H₂S yang masuk dengan menghasilkan senyawa sulfat yang dapat menurunkan pH dan air yang dapat mempertahankan kadar air bahan (Gambar 8 a, b, dan c).

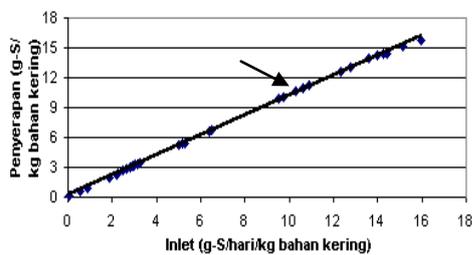


Gambar 6. Perubahan penyerapan gas H₂S oleh biofilter dengan bahan pengisi kompos dan *Thiobacillus sp.* (a. inlet ■, outlet □); b. pH dan Jumlah mikroba; c. Kadar air; d. Penyerapan sulfur (◇ inlet, ■ outlet)



Gambar 8. Penyerapan gas H₂S oleh biofilter dengan bahan pengisi arang aktif dan *Thiobacillus sp.*(a. Konsentrasi dan inlet-outlet gas; b. pH dan jumlah mikroorganisme; c. Kadar air; d. Penyerapan sulfur)

Kolom biofilter dengan bahan pengisi arang aktif dan kultur bakteri yang ada dalam kolom biofilter dapat menyerap dan mengubah H₂S yang dilewatkan selama 37 hari (Gambar 8d) dengan maksimum penyerapan sulfur (Gambar 9) 14,66 g-S/kg arang aktif kering. Efisiensi kolom dapat bertahan di atas 95% pada beban sulfur yang dimasukkan ke dalam kolom sebesar 10,9 g-S/kg bahan kering (Gambar 9, panah). Hal ini disebabkan karena hari ke 37 jumlah mikroba yang ada dalam kolom telah mengalami penurunan jumlah sehingga kolom tersebut sudah tidak dapat lagi merubah dan menyerap H₂S yang dilewatkan. Sehingga kolom serta kultur *Thiobacillus sp.* yang ada dalam kolom jenuh.



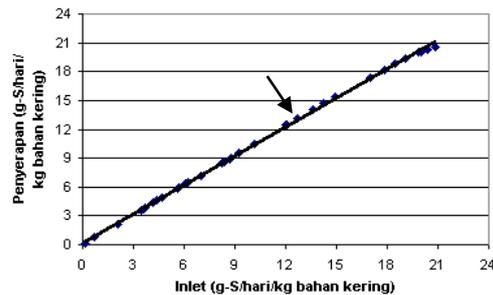
Gambar 9. Penyerapan maksimum sulfur kolom biofilter dengan bahan pengisi arang aktif dan kultur *Thiobacillus sp.*

Penyerapan gas H₂S pada kolom biofilter dengan bahan pengisi campuran kompos dan arang aktif yang diinokulasi dengan *Thiobacillus sp.*

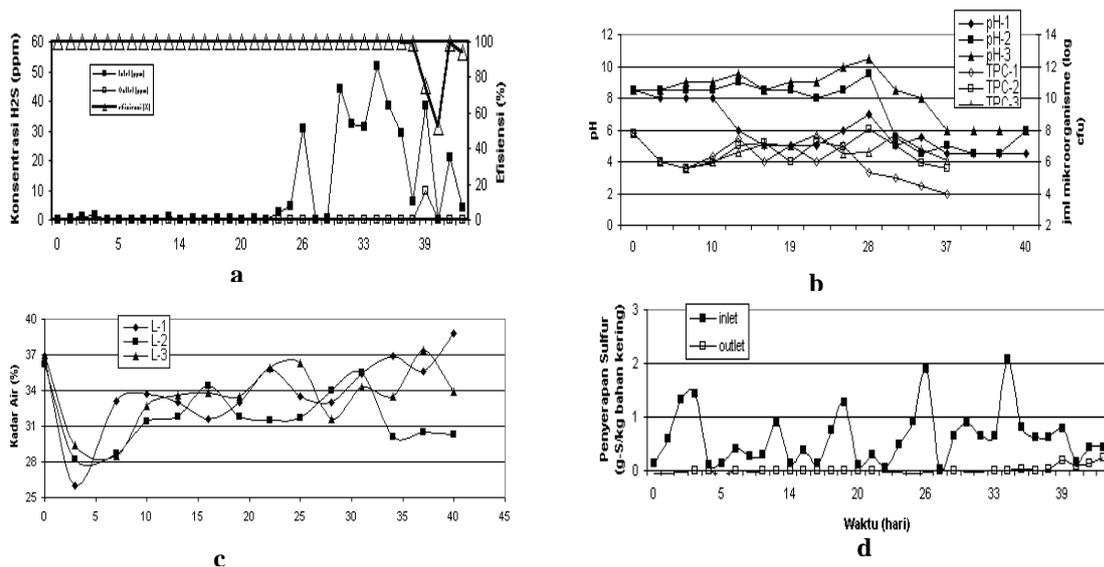
Pada awal pemasukan kultur terlihat bahwa pH dari bahan cenderung basa dengan nilai 8 dan jumlah mikroba yang mengalami penurunan. Hal ini disebabkan karena kultur yang digunakan melakukan penyesuaian dengan lingkungan barunya yang merupakan campuran antara bahan organik dan bahan anorganik. Memasuki hari ke 10 jumlah

mikroba dalam kolom memperlihatkan peningkatan. Hal ini disertai dengan penurunan pH serta kadar air yang cenderung naik dan konstan (Gambar 10a, b, dan c). Hal ini menunjukkan bahwa kultur yang digunakan telah memasuki fase logaritmik dalam kolom tersebut sehingga dapat menyerap dan mengubah H₂S yang dilewatkan menjadi sulfat dan air.

Kolom biofilter dengan bahan pengisi campuran dan kultur bakteri yang ada dapat menyerap dan mengubah H₂S yang dilewatkan selama 39 hari (Gambar 10d) dengan maksimum penyerapan sulfur 20,49 g-S/kg bahan kering. Efisiensi kolom dapat bertahan di atas 95% pada beban sulfur yang dimasukkan ke dalam kolom sebesar 12,9 g-S/kg bahan kering (Gambar 11, panah). Hal ini disebabkan karena pada hari ke 39 jumlah mikroba yang ada dalam kolom telah mengalami penurunan jumlah karena nutrisi yang ada dalam bahan pengisi telah habis. Selain itu juga terjadi akumulasi sulfat yang dihasilkan oleh bakteri sehingga kolom tersebut sudah tidak dapat lagi merubah dan menyerap H₂S yang dilewatkan dan mengalami kejenuhan.



Gambar 11. Penyerapan maksimum sulfur kolom biofilter dengan bahan pengisi campuran dan kultur *Thiobacillus sp.*



Gambar 10. Perubahan penyerapan gas H₂S oleh biofilter dengan bahan pengisi campuran kompos dan arang aktif (1:1) dan *Thiobacillus sp.* (a. Konsentrasi dan inlet-outlet gas; b. pH dan jumlah mikroorganisme; c. Kadar air; d. Penyerapan sulfur)

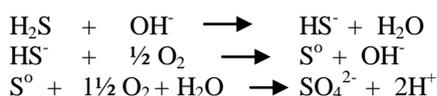
Campuran merupakan media yang paling banyak menyerap sulfur (Tabel 4). Hal ini disebabkan dalam bahan tersebut terdapat bahan organik dan bahan anorganik yang merupakan makanan bagi kultur mikroba yang digunakan. Kemampuan penyerapan sulfur oleh bakteri dalam arang aktif lebih rendah dibandingkan dengan bahan campuran karena bahan ini selain mengandung racun bagi mikroba juga memiliki kandungan air yang rendah sehingga sedikit bakteri yang dapat hidup di dalamnya.

Tabel 4. Penyerapan sulfur oleh bahan pengisi dengan penambahan kultur *Thiobacillus sp.*

Jenis bahan pengisi	Penyerapan sulfur (g-S/kg bahan kering)	Lama operasi (hari)
Kompos	11,85	6
Arang Aktif	14,66	37
Campuran (1:1)	20,49	39

Kompos memiliki kemampuan yang paling rendah serta waktu operasional yang paling singkat diantara seluruh bahan pengisi. Hal ini disebabkan karena kepadatan kompos dalam kolom yang kurang sehingga gas yang masuk dapat membentuk aliran-aliran udara, sehingga hanya sedikit gas H₂S yang dapat teruraikan oleh kultur *Thiobacillus sp.*

Pembentukan sulfat oleh bakteri *Thiobacillus sp.* ditunjukkan oleh reaksi berikut. Menurut Lens dan Pol (2000), reaksi pembentukan terjadi karena adanya kelebihan dari O₂ dan kurangnya konsentrasi sulfide.



Reaksi di atas merupakan reaksi yang menunjukkan aktivitas metabolisme kultur *Thiobacillus sp.* dalam kolom biofilter. Reaksi menghasilkan sulfat yang dapat menurunkan pH bahan serta air yang dapat mempertahankan kadar air dari masing-masing bahan pengisi yang digunakan.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan penelitian ini, didapatkan hasil bahwa bahan pengisi yang terbaik yang dapat digunakan sebagai penyerap senyawa sulfur adalah campuran antara kompos dan arang aktif (1:1). Pada pengujian fisik bahan campuran dapat menyerap sulfur sebanyak 0,87 g-S/kg bahan campuran kering sedangkan kompos 0,22 g-S/kg kompos kering dan arang aktif 0,37 g-S/kg berat kering bahan.

Pada kolom biofilter dengan penambahan kultur, media campuran memberikan hasil terbaik dengan kemampuan untuk menyerap sulfur yang tinggi dengan waktu yang lama yaitu 20,49 g-S/kg bahan campuran kering bahan dengan waktu 39 hari. Sedangkan bahan pengisi arang aktif memiliki kemampuan menyerap 14,66 g-S/kg arang aktif kering bahan dengan waktu 37 hari dan kompos mampu menyerap 11,85 g-S/kg kompos kering bahan dengan waktu 6 hari.

Saran

Penghilangan senyawa sulfur (termasuk H₂S) menghasilkan produk asam sulfat yang akan menurunkan pH media dan menghambat perkembangan bakteri *Thiobacillus*. Dengan demikian perlu pengontrolan pH media lebih intensif. Tanah dapat dikombinasikan karena memiliki kapasitas buffering yang lebih baik. Alternatif bahan pengisi yang lebih

mudah dengan porositas tinggi dan diduga berdaya serap polutan yang baik adalah arang sekam. Pengembangan skala perlu diperhatikan pencampuran yang homogen antara arang aktif atau arang sekam dengan kompos atau tanah.

DAFTAR PUSTAKA

- Atlas R.M. 1993. Handbook of Microbiology Media. CRC Press Inc. Florida.
- Cho J.J., M. Hirai, dan M. Shoda. 1991. Catalytic Oxidation of Hydrogen Sulphide by Air Over an Activated Carbon Fibre. *J.Applied Catalysis A : General*, 79 :241-248.
- Edmonds P. 1978. Microbiology an environmental Perspective. Collier Macmillan Publisher. London-New York.
- Lay B.W. dan Sugyohastowo, 1989. Mikrobiologi. Pusat Antar Universitas Bioteknologi-IPB. Bogor.
- Lee S.K. dan M. Shoda. 1989. Biological Deodorization Using Activated Carbon Fabric as a Carrier of Microorganisms. *Fermentation and Bioengineering*. 68 (6) : 437-442.
- Lens P. dan L.H. Pol. 2000. Environmental Technologies to treat Sulfur Pollution. IWA Publishing. London.
- Ottengraf S.P.P. 1987. Exhaust Gas Purification in Biotechnology 8 (eds). Rehm, H.J and Reed, G. VCH. Tokyo.
- Shoda M. 1991. Methods for the Biological Treatment of Exhaust Gases in Biological Degradation of Wastes (ed. Martin, A.M), Elsevier Science Pub Ltd.
- Webster T.S., J.S. Deviny, dan E.M. Torres. 1997. Microbial Ecosystems in Compost and Granular Activated Carbon Biofilters. *Biotechnology and Bioengineering*, 53: 296-303.
- Yani M. 1999. Study of Ammonia Removal by Nitrifying Bacteria. [Thesis]. Tokyo Institute of Technology. Tokyo.