

## PENGARUH KETINGGIAN FILTER DAN PENAMBAHAN NUTRISI PADA PROSES BIOFILTRASI N<sub>2</sub>O DENGAN MEDIUM BERBASIS KOMPOS

Tania S. Utami, Josia Simanjuntak, Heri Hermansyah, Slamet, M. Nasikin  
Fakultas Teknik Kimia-UI

### ABSTRAK

**PENGARUH KETINGGIAN FILTER DAN PENAMBAHAN NUTRISI PADA PROSES BIOFILTRASI N<sub>2</sub>O DENGAN MEDIUM BERBASIS KOMPOS.** Dinitrogen Monoksida (N<sub>2</sub>O) merupakan emisi dari proses industri dan kegiatan pertanian. Gas tersebut merupakan gas polutan berbahaya dan menyebabkan masalah lingkungan yang serius seperti pemanasan global. Teknologi kontrol tradisional seperti *selective catalytic reduction* (SCR) dan *selective non-catalytic reduction* (SNCR) yang digunakan untuk mengontrol emisi N<sub>2</sub>O pada kegiatan-kegiatan industri, membutuhkan suhu yang tinggi, penggunaan katalis, biaya instalasi dan operasi yang tinggi, serta menghasilkan produk buangan dalam jumlah cukup besar. Pengolahan N<sub>2</sub>O secara biologis adalah salah satu alternatif yang digunakan dalam penghilangan sampah industri dan ramah lingkungan. Sistem pengolahan biologis bisa beroperasi pada suhu ambien dengan menggunakan inokula mikroba yang murah. Penelitian ini bertujuan mengkaji pengaruh parameter operasional yaitu ketinggian filter dan penambahan nutrisi terhadap efisiensi penghilangan N<sub>2</sub>O. Biofilter yang digunakan dalam penelitian ini merupakan peralatan dalam skala kecil. Sumber gas N<sub>2</sub>O yang berasal dari tabung gas N<sub>2</sub>O dalam udara dilewatkan ke dalam kolom biofilter dan diresirkulasi dengan pompa peristaltik. Kolom biofilter tersebut berisi media filter berupa kompos. Proses resirkulasi gas dilakukan selama 6 jam dalam satu hari yang kemudian akan dianalisa konsentrasinya pada setiap jam. Analisa konsentrasi gas dilakukan dengan menggunakan kromatografi gas jenis TCD. Hasil penelitian menunjukkan bahwa reduksi gas N<sub>2</sub>O yang terbaik didapatkan pada ketinggian filter 50 cm pada laju alir sirkulasi 50 cc/menit sebesar 66,52%. Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa efisiensi reduksi gas N<sub>2</sub>O dapat dioptimalkan dengan penambahan nutrisi dan laju alir sirkulasi yang lebih besar mencapai 91,49%.

### ABSTRACT

*Nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) is mostly emitted from various industrial processes and agricultural activities, causes serious environmental problems such as global warming and considered as a dangerous pollutant. Traditional control technologies, such as selective catalytic reduction (SCR) and selective non catalytic reduction (SNCR), required high temperatures, use of catalysts, involving high installation and operation costs, and generating a large quantity of secondary waste. Biofiltration offers a number of advantages over traditional methods, such as highly efficient removal of pollutants, low operating cost, does not generate undesirable byproducts, and degrades many organic and inorganic compound into harmless oxidation products. In this paper, effects of operational parameters such as filter length and usage of nutrition towards N<sub>2</sub>O reduction efficiency will be observed. The biofilter used in this research is a laboratory scaled instrument. The N<sub>2</sub>O gas is fed from the top of the column and recirculated using peristaltic pump for 6 hours a day. The packing material used in this research is compost from cow manure. The N<sub>2</sub>O concentration in the off-gas is monitored using GC TCD (Gas Chromatography Thermal Conductivity Detector). The result of this research shows that the highest N<sub>2</sub>O gas reduction efficiency is obtained at the highest biofilter length 50 cm at gas circulation flow rate = 50 cc/min conditions, 66.52% of removal efficiency was achieved. The result also shows that N<sub>2</sub>O gas removal efficiency could be optimized by adding nutritional supplement, hence 91.49% of removal efficiency was achieved under 50 cm biofilter length and higher N<sub>2</sub>O gas circulation flowrate.*

### PENDAHULUAN

Dinitrogen Monoksida (N<sub>2</sub>O) adalah senyawa yang umumnya digunakan sebagai senyawa anestetik dalam bidang pembedahan atau kedokteran gigi. Sering disebut juga dengan gas ketawa karena efek euforia yang ditimbulkannya ketika menghirupnya. Kandungan gas N<sub>2</sub>O yang biasa dipakai pada suntikan anestetik adalah 50-100 ppm yang merupakan batas standar eksposur gas. Gas ini juga digunakan sebagai pengoksidan dalam kendaraan balap

untuk meningkatkan tenaga output dari mesin.

N<sub>2</sub>O adalah salah satu gas yang memberi kontribusi terbesar pada pemanasan global. Meskipun sifat pemanasan radiasinya lebih rendah dibandingkan CO<sub>2</sub>, namun dampaknya terhadap pemanasan global 310 kali lebih besar per massa CO<sub>2</sub>. Meskipun konsentrasinya relatif rendah, gas N<sub>2</sub>O sangat sulit terurai di atmosfer. N<sub>2</sub>O merupakan gas rumah kaca terbanyak

keempat di atmosfer setelah CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, dan uap air. Gas nitrogen oksida lain juga memberikan dampak terhadap pemanasan global secara tidak langsung, dengan kontribusi terhadap produksi ozon troposferik pada pembentukan smog.

N<sub>2</sub>O banyak diemisikan oleh bakteri pada tanah. Kegiatan pertanian seperti penanganan limbah binatang dan penyuburan tanah dapat memicu bakteri untuk memproduksi N<sub>2</sub>O lebih banyak. Sektor peternakan menghasilkan 65% emisi N<sub>2</sub>O. Sektor perindustrian menghasilkan 20% emisi N<sub>2</sub>O seperti pada produksi nilon dan asam nitrat serta pembakaran bahan bakar pada mesin pembakaran internal.

Ada dua teknologi utama reduksi NO<sub>x</sub> yang digunakan selama ini yakni teknologi pra-pembakaran (*pre-combustion technologies*) dan teknologi pasca-pembakaran (*post-combustion technologies*). Teknologi pasca pembakaran utama yang digunakan untuk mereduksi emisi NO<sub>x</sub> adalah *selective non-catalytic reduction* (SNCR) dan *selective catalytic reduction* (SCR). Kedua proses ini membutuhkan suhu yang tinggi dan penggunaan katalis. Selain itu, proses ini membutuhkan biaya instalasi dan operasi yang tinggi, serta menghasilkan produk buangan dalam jumlah cukup besar [1].

Sistem pengolahan fisiokimia yang didasarkan pada teknik-teknik fisiokimia seperti adsorpsi, absorpsi, *scrubbing*, dan kondensasi untuk mengontrol emisi, merupakan sistem yang kurang efektif, membutuhkan banyak energi, menggunakan banyak zat kimia atau menggunakan pengoperasian yang rumit. Sistem pengolahan gas buang secara biologis merupakan suatu pengolahan alternatif untuk proses pengolahan konvensional dan seringkali lebih disukai karena sistem ini lebih efektif dalam menangani kontaminan dalam konsentrasi rendah dengan laju alir tinggi.

Salah satu sistem pengolahan biologis yang paling sering digunakan adalah sistem biofilter yang memberikan porositas yang tinggi, ketersediaan nutrisi yang tinggi, kapasitas retensi dengan kelembaban yang tinggi dan kapasitas *buffering* yang tinggi guna mempertahankan pertumbuhan mikrobial pada matriks support yang diinginkan [2, 3, 4]. Efektivitas dari biofilter tergantung pada kegiatan dari aktivitas

populasi mikroba dan jenis pengayaan (*enrichment*) yang dilakukan selama tahap inokulasi. Jenis matriks support juga mempengaruhi stabilitas jangka panjang dan kinerja dari biofilter [5, 6]. Bahan packing yang paling sering digunakan dalam biofilter adalah gambut, kompos, karbon teraktivasi, tanah, bulu unggas, serpihan kayu, dan batu lava.

Baru-baru ini proses biologis telah memperoleh banyak perhatian sebagai suatu alternatif untuk pengolahan dari polusi udara [7]. Prinsip dari biofiltrasi relatif sederhana; aliran udara yang terkontaminasi dialirkan melalui suatu unggun berpori dimana suatu kultur mikroorganisme pengurai polutan diimobilisasi [8]. Udara berbau dan terkontaminasi kemudian melewati medium, dan zat kontaminan dalam aliran udara diadsorb oleh biofilm, kemudian zat kontaminan tersebut dioksidasi untuk menghasilkan biomassa, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> dan SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>.

Biofiltrasi merupakan suatu teknologi berkembang yang menawarkan beberapa keuntungan dibandingkan dengan metode tradisional dalam mengontrol zat polutan udara dalam konsentrasi rendah. Selain merupakan penghilang polutan yang sangat efisien, investasi modal dan biaya operasi yang rendah, kondisi operasional yang aman, dan konsumsi energi yang rendah, biofilter tidak mengeluarkan produk samping yang tidak diinginkan dan juga mengkonversi banyak senyawa organik dan anorganik ke dalam produk oksidasi yang tidak berbahaya [2]. Selain itu, desain biofilter yang sederhana juga merupakan alasan mengapa biofilter sering digunakan, serta biaya investasi dan biaya operasional biofiltrasi yang lebih rendah dibandingkan dengan proses termal dan oksidasi kimia.

Dalam biofiltrasi, beberapa faktor dikontrol sehingga mikroorganisme dapat mengabsorb dan terdekomposisi secara efisien. Suhu, kandungan kelembaban, tingkat pH, laju alir, laju *loading* permukaan dan struktur fisik biofilter merupakan faktor-faktor yang mempengaruhi efisiensi dari proses biofiltrasi. Biofilter dapat beroperasi secara efisien pada kandungan kelembaban dalam range 50-70% dan suhu antara 15-35°C [9].

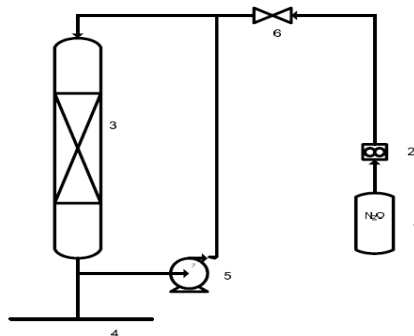
Dalam penelitian ini, kompos akan digunakan sebagai media filter dalam mereduksi N<sub>2</sub>O. Kompos sebelumnya telah

diteliti sebagai media filter yang baik dalam mereduksi konsentrasi  $\text{NO}$  dengan efisiensi reduksi mencapai 95% setelah 40 hari beroperasi dengan kondisi ketinggian biofilter 120 cm dan pada laju alir gas 30 L/jam [10]. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh dari ketinggian biofilter dan penggunaan nutrisi tambahan terhadap kemampuan reduksi  $\text{N}_2\text{O}$ .

## METODOLOGI

Medium filter yang digunakan adalah kompos yang berasal dari kotoran sapi yang diambil dari peternakan sapi di Kelurahan Kukusan, Depok. Kompos diayak terlebih dahulu untuk menyeragamkan ukuran, serta dikeringkan pada suhu ruang  $25^\circ\text{C}$  dengan humiditas relatif sekitar 60-72%. Gas terdiri dari campuran  $\text{N}_2\text{O}$  dalam udara. Nutrisi tambahan untuk biofilter disiapkan sebagai sumber karbon (glukosa), zat anorganik, dan kelembaban. Larutan nutrisi ( $\text{pH}=8$ ) mengandung komponen berikut ini (dalam 1 L air):  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  (0,4 g) ;  $\text{NH}_4\text{Cl}$  (0,3 g) ;  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  (0,4 g) ;  $\text{CH}_3\text{COONa}$  (2,93 g). Material anorganik ini dipilih karena sebelumnya pernah digunakan mengembangkan bakteri penitrifikasi aerobik [6].

Diagram skematik dari biofilter yang digunakan pada penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram skematik biofilter

Komponen-komponen dalam biofilter adalah sebagai berikut:

1. Suplai gas  $\text{N}_2\text{O}$  (PT. Aneka Gas Indonesia)
2. Flow control (Dwyer ©, Range laju alir gas 0 – 200 cc/menit)
3. Kolom biofilter (bahan *acrylic*)
4. Tempat pengambilan sampel  $\text{N}_2\text{O}$
5. Pompa peristaltik (MasterFlex® L/STM model 7518-12, 230VAC, 50/60Hz, 6-600 RPM)

## 6. Valve (On-off valve, stainless steel)

Persambungan pada pipa selang dilapisi insulator Parafilm® dan Cable Ties® guna menghindari adanya kebocoran pada sistem biofilter.

Pada tahap awal penelitian dilakukan proses kalibrasi dan uji kebocoran. Proses kalibrasi dilakukan terhadap *flow control* yang digunakan, serta pada luas area dan volum  $\text{N}_2\text{O}$ . Pengoperasian sistem biofilter dilakukan dengan mengalirkan gas  $\text{N}_2\text{O}$  dari bagian atas kolom biofilter dan disirkulasi dengan pompa peristaltik selama 6 jam. Sampel diambil setiap satu jam pada septum dengan menggunakan *syringe GC*, yang kemudian diinjeksikan ke dalam GC jenis TCD (*Thermal Conductivity Detector*). Konsentrasi keluaran gas  $\text{N}_2\text{O}$  ditunjukkan oleh data *peak* pada GC, yang telah disiapkan dan dikalibrasikan sebelum percobaan dilaksanakan. Efek dari faktor operasi seperti ketinggian kolom dan pengaruh nutrisi tambahan akan diinvestigasi dan dianalisa.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

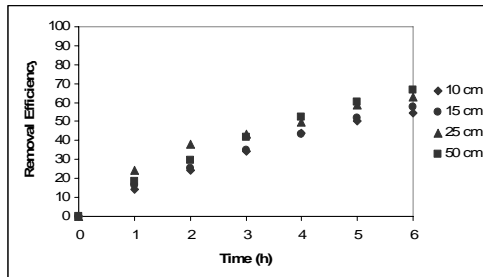
Pembahasan berikut ini akan menganalisa mengenai kinerja biofilter dalam mereduksi  $\text{N}_2\text{O}$ . Kinerja biofilter dalam mereduksi  $\text{N}_2\text{O}$  ditunjukkan oleh berkurangnya luas area  $\text{N}_2\text{O}$  pada GC karena adsorpsi oleh kompos. Dalam penelitian ini, pengamatan biofiltrasi dilakukan setiap jam dalam 6 jam dengan menggunakan GC.

### Pengaruh ketinggian filter terhadap reduksi $\text{N}_2\text{O}$

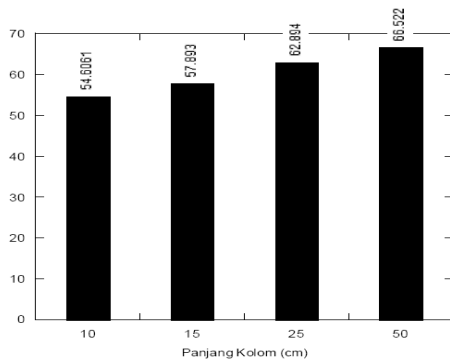
Tujuan penelitian biofiltrasi dengan variasi ketinggian filter adalah ingin melihat pengaruh dari ketinggian medium kompos terhadap reduksi gas  $\text{N}_2\text{O}$ . Medium kompos diset pada ketinggian 10, 15, 25, dan 50 cm. Hasil dari uji biofiltrasi dengan variasi ketinggian filter dapat dilihat pada Gambar 2.

Fenomena yang terjadi pada proses ini adalah reduksi  $\text{N}_2\text{O}$  karena pengaruh lamanya waktu adsorpsi gas  $\text{N}_2\text{O}$  oleh kompos dan pengaruh ketinggian medium filter. Gambar 2 menunjukkan bahwa semakin lama waktu kontak antara kompos dan gas  $\text{N}_2\text{O}$  serta ketinggian medium kompos menyebabkan efisiensi reduksi  $\text{N}_2\text{O}$  yang lebih tinggi. Grafik ini juga menunjukkan bahwa semakin tinggi medium kompos maka efisiensi reduksi  $\text{N}_2\text{O}$  lebih

tinggi. Hal ini ditunjukkan oleh kecenderungan garis yang semakin meningkat terhadap lama waktu kontak dan ketinggian medium filter. Efisiensi reduksi dari masing-masing ketinggian kompos pada  $t = 6$  jam dapat dilihat pada **Gambar 3**.



**Gambar 2.** Pengaruh ketinggian filter terhadap reduksi  $N_2O$  ( $f = 50$  cc/menit/medium kering)



**Gambar 3.** Efisiensi reduksi pada variasi ketinggian filter ( $f = 50$  cc/menit, medium kering,  $t = 6$  jam)

Pada **Gambar 3** dapat dilihat bahwa efisiensi reduksi tertinggi terdapat pada ketinggian medium filter tertinggi 50 cm dengan efisiensi reduksi 67,86%. Fenomena yang terjadi pada proses ini disebabkan oleh proses adsorpsi karena pengaruh lama kontak antara pupuk dan gas  $N_2O$  serta ketinggian kompos. Faktor yang lebih dominan di sini adalah ketinggian medium kompos karena uji biofiltrasi pada variabel tetap waktu yang sama. Efisiensi reduksi pada ketinggian medium filter 50 cm adalah yang paling besar karena jumlah mikroba denitrifikasi dalam media biofilter lebih banyak secara kuantitas dibandingkan dengan ketinggian lainnya. Mikroba denitrifikasi adalah komponen paling penting dalam reduksi gas  $N_2O$ . Hal ini karena mikroba denitrifikasi membantu menguraikan senyawa gas  $N_2O$  menjadi senyawa  $N_2$  dan  $O_2$  yang tidak berbahaya.

Senyawa  $N_2$  dan  $O_2$  adalah komponen penyusun udara terbesar.

Mikroba denitrifikasi pada ketinggian medium kompos 50 cm lebih banyak dibandingkan pada ketinggian lainnya, maka gas  $N_2O$  akan semakin banyak terurai. Semakin banyak gas  $N_2O$  yang terurai maka konsentrasi gas  $N_2O$  pada aliran keluar kolom akan menurun. Menurunnya konsentrasi gas  $N_2O$  berarti efisiensi reduksi  $N_2O$  semakin tinggi karena jumlah gas  $N_2O$  yang teradsorpsi berbanding lurus terhadap efisiensi reduksi  $N_2O$ . Efisiensi reduksi gas  $N_2O$  juga semakin besar pada setiap jam waktu kontak

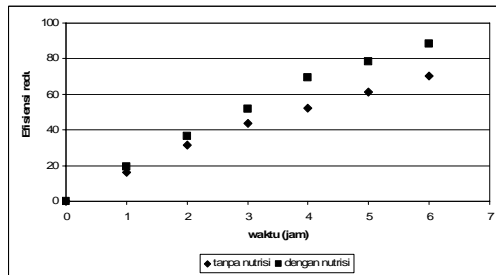
antara kompos dengan gas  $N_2O$ . Waktu kontak pada uji biofiltrasi ini adalah 6 jam. Adapun uji biofiltrasi dilakukan dengan sistem sirkulasi dengan pompa peristaltik.

Jika dikaitkan dengan kurva terobosan adsorpsi pada umumnya, maka konsentrasi suatu adsorbat akan menurun karena diserap oleh adsorben hingga pada waktu tertentu sebelum mengalami kesetimbangan adsorpsi. Dengan demikian, konsentrasi  $N_2O$  akan menurun karena teradsorpsi oleh media biofilter pada setiap interval waktu tertentu sebelum media biofilter mengalami penenuhan. Kontak waktu yang semakin lama antara gas  $N_2O$  dengan medium biofilter meningkatkan kemungkinan adsorpsi antara gas  $N_2O$  dengan medium biofilter. Hal ini karena gas  $N_2O$  akan lebih lama tinggal dalam medium biofilter. Adsorpsi gas  $N_2O$  oleh medium biofilter akan menyebabkan penurunan konsentrasi  $N_2O$  yang berarti efisiensi reduksi  $N_2O$  yang semakin tinggi.

### Pengaruh penambahan nutrisi terhadap reduksi $N_2O$

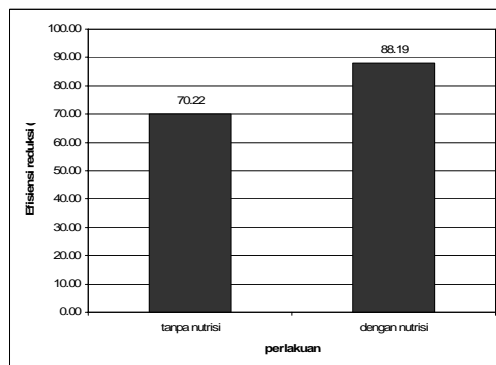
Tujuan penelitian biofiltrasi dengan membandingkan tanpa dan dengan penambahan nutrisi pada ketinggian medium terbaik dan laju alir sirkulasi gas maksimal (200 cc/menit) adalah ingin melihat pengaruh penambahan nutrisi terhadap reduksi gas  $N_2O$ . Nutrisi pupuk dibuat dengan bahan-bahan kimia seperti yang telah dijelaskan sebelumnya. Material anorganik tersebut dipilih karena sebelumnya pernah digunakan mengembangkan bakteri penitrifikasi aerobik [6]. Hasil perbandingan dari tanpa dan dengan penambahan nutrisi pada ketinggian medium kompos 50 cm dan laju

alir sirkulasi 200 cc/menit dapat dilihat pada **Gambar 4**.



**Gambar 4.** Pengaruh penambahan nutrisi terhadap reduksi  $N_2O$  ( $h = 50$  cm,  $f = 200$  cc/menit)

Fenomena yang terjadi pada proses ini adalah reduksi  $N_2O$  karena peristiwa adsorpsi dan degradasi  $N_2O$  oleh pupuk dengan penambahan nutrisi. Efisiensi reduksi dari masing-masing proses pada  $t = 6$  jam dapat dilihat pada **Gambar 5**.



**Gambar 5.** Efisiensi reduksi pada pengaruh penambahan nutrisi ( $h = 50$  cm,  $f = 200$  cc/menit,  $t = 6$  jam)

Pada **Gambar 5**, dapat dilihat efisiensi reduksi tertinggi terdapat pada saat penggunaan nutrisi dengan efisiensi reduksi mencapai 91,49%. Selain proses adsorpsi, terjadi proses degradasi gas  $N_2O$  karena penambahan nutrisi pada kompos. Nutrisi pada kompos mengandung unsur C, N, dan P karena ketiga unsur ini merupakan tiga nutrisi utama (makronutrien) yang dibutuhkan oleh bakteri dalam melakukan metabolisme sel untuk menghasilkan senyawa-senyawa yang penting dalam pertumbuhan bakteri. Nutrisi ini juga memungkinkan adanya perkembangan jumlah bakteri di dalam kompos.

Unsur C merupakan unsur utama yang berperan dalam penyusunan sel-sel bakteri. Unsur N memiliki peranan yang sangat penting dalam penyusunan asam nukleat,

asam amino dan enzim-enzim. Sedangkan unsur P berperan dalam pembentukan asam nukleat dan fosfolipid. Sumber nutrisi C berasal dari  $CH_3COONa$ , sumber nutrisi N berasal dari  $NH_4Cl$  karena senyawa ini memiliki energi asimilasi yang rendah, dan sumber nutrisi P berasal dari  $K_2HPO_4$ . Nutrisi yang digunakan memiliki perbandingan C:N:P = 100:10:1 dalam 1 liter air [6]. Rasio ini telah diteliti sebagai rasio paling optimum dalam mendegradasi senyawa nitrogen. Hal inilah yang menyebabkan efisiensi reduksi  $N_2O$  menjadi lebih besar dibandingkan tanpa penggunaan nutrisi.

## KESIMPULAN

1. Kompos dapat digunakan sebagai medium biofilter dalam mereduksi gas  $N_2O$ .
2. Semakin tinggi panjang medium biofilter, maka semakin banyak gas  $N_2O$  yang teradsorpsi oleh medium biofilter.
3. Efisiensi reduksi tertinggi gas  $N_2O$  oleh medium biofilter adalah 66,52% pada ketinggian medium 50 cm dan laju alir sirkulasi gas  $N_2O$  50 cc/menit selama 6 jam pengoperasian.
4. Penambahan nutrisi dapat mempertinggi reduksi gas  $N_2O$  hingga mencapai 91,49% pada ketinggian medium 50 cm dan laju alir sirkulasi gas maksimal sebesar 200 cc/menit.

## DAFTAR PUSTAKA

1. JIN, Y., M.Veiga, C.Kennes, 2005, Bioprocesses for the removal of nitrogen oxides from polluted air, J. Chem. Technol. Biotechnol. 80, 483–494.
2. DEVINNY, J.S., M.A. Deshusses, T.S.Webster, 1999, Biofiltration for Air Pollution Control, Lewis Publishers.
3. KENNES, C., Veiga, M.C., 2001, Conventional biofilters. In: Kennes, C., Veiga, M.C. (Eds.), Bioreactors for Waste Gas Treatment. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, pp. 47–98.
4. DASTOUS, P.A., Soreanu, G., Nikiema, J., Heitz, M., 2005, Biofiltration of the alcohols on a mature bed compost. In: Proceedings of the Annual Air & Waste Management Association, Pittsburgh, PA.

5. KENNES, C., Thalasso, F., 1998, Waste gas biotreatment technology. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 72, 303–319.
6. RENE, E.R., Murthy, D.V.S., Swaminathan, T., 2005, Performance evaluation of a compost biofilter treating toluene vapours. *Process. Biochem.* 40, 2771–2779.
7. KIM, N.-J., Y. Sugano, M. Hirai, M. Shoda, 2000, Removal of a high load of ammonia gas by a marine bacterium, *Vibrio alginolyticus*, *J. Biosci. Bioeng.* 90, 410–415.
8. DESHUSSES, M.A., H.H.J. Cox, Biotrickling Filters for Air Pollution Control, Department of Chemical and Environmental Engineering University of California.
9. JANNI, K.A., Nicolai, R., 2000, Designing biofilters for livestock facilities. In: *Livestock and Poultry Odor Workshop II*. Department of Biosystems and Agricultural Engineering, University of Minnesota, St. Paul, MN, USA.
10. YANG, Wan-Fa, et al., The effects of selected parameters on the nitric oxide removal using biofilter, 2007, *Hazard. Mater. Journal*.