

PEMODELAN UNJUK KERJA BIOFILTER DALAM PENYISIHAN H_2S dan NH_3

D. Suwardin¹⁾, T. Setiadi²⁾, A. Djajadiningrat¹⁾, M. R. Bilad²⁾

Abstrak

Percobaan penyisihan H_2S dan NH_3 menggunakan biofilter dalam skala laboratorium telah dilaksanakan dengan menggunakan dua jenis media (limbah padat karet dan serabut sawit) dan konsorsium mikroorganisme yang melekat secara alami dalam media. Tujuan percobaan ini adalah untuk menentukan kinerja biofilter serta evaluasi pengembangan model biofilm, pengendali reaksi dan konveksi-difusi-reaksi (KDR). Hasil pengujian menunjukkan efisiensi penyisihan gas H_2S menggunakan kedua jenis media mencapai 99,5 %, dan untuk kontaminan NH_3 mencapai 99% pada media serabut sawit dan bervariasi pada selang 60-98 % untuk media limbah padat karet. Dari pengembangan model menunjukkan bahwa profil laju penyisihan kontaminan dapat diprediksi dengan model biofilm dan model pembatas reaksi. Kinetika penyisihan tersebut dikendalikan oleh reaksi biokimia mikroorganisme pada biofilm. Model KDR dinilai cocok untuk memprediksi profil konsentrasi kontaminan sepanjang biofilter.

Kata kunci : biofiltrasi, biofilm, konveksi-difusi-reaksi, kinetika, media, H_2S , NH_3

Pendahuluan

Permasalahan limbah gas dari industri pengolahan berbasis komoditas pertanian terutama bersifat bau khas menyengat, yang berasal dari lokasi penyimpanan bahan olah, proses pengeringan awal (*pre-drying*) dan dari uap bekas pengeringan. Bau tersebut sering mengganggu kenyamanan lingkungan dan dapat menimbulkan konflik dengan masyarakat di sekitar pabrik. Penyebab utama timbulnya pencemaran udara khususnya bau (malodor) dari pabrik pengolahan berbasis pertanian adalah dari kondisi bahan olahnya sendiri. Bahan olah komoditas pertanian umumnya mengandung kadar air yang tinggi sehingga kemungkinan timbulnya aktifitas mikrobiologis semakin besar.

Komponen senyawa yang terkandung dalam bahan olah tersebut selama penyimpanan akan mengalami proses penguraian menjadi senyawa berbau antara lain dalam bentuk senyawa sulfida (H_2S), amonia, trimetil amin, dietil amin, asam-asam organik (asetat, propionat, butirat, valerat).

Teknik pengendalian yang diterapkan secara komersial saat ini dinilai masih kurang memadai, yaitu dengan teknik cerobong yang dilengkapi filter. Teknik tersebut masih mempunyai kendala yaitu rendahnya efisiensi penyisihan jumlah asap (*fog*) dari emisi udara yang dihasilkannya, sedangkan penggunaan teknik pengaliran menggunakan *scrubber* dinilai terlalu mahal dan kurang praktis dalam operasionalnya.

Teknik biofiltrasi merupakan salah satu alternatif yang tepat untuk dikembangkan dalam upaya penyisihan kontaminan yaitu berdasarkan kemampuan aktifitas mikroba. Pada saat ini penerapannya tidak terbatas hanya pada penurunan bau namun juga telah dikembangkan menjadi suatu teknik pengendalian pencemaran udara yang berfungsi untuk mengeliminasi sejumlah senyawa organik dan anorganik yang tidak diinginkan keha-dirannya (Dick dan Ottengraf, 1991).

Keunggulan sistem biofiltrasi dibanding dengan alternatif pengendalian pencemaran udara lainnya adalah biaya investasi dan operasional rendah, kebutuhan energi rendah, serta tanpa residu dan *by-products* yang memerlukan perlakuan lebih lanjut (Eweis dkk, 1998). Pengetahuan fundamental mengenai biofilter masih merupakan suatu kotak hitam (*black boxes*), walaupun aplikasi biofilter telah meluas (Deshussess, 1994). Penelitian yang intensif diperlukan untuk memperoleh data dalam membuat rancangan dan *scale up* yang rasional, serta meningkatkan efisiensi penyisihan biofilter.

Untuk mengembangkan teknik biofiltrasi diperlukan jenis media serta mikroba yang tepat serta memiliki sistem regenerasi biofilter. Dalam penelitian ini dikaji mengenai penggunaan media yang berasal limbah padat pengolahan karet (A), dan serabut sawit sebagai limbah pengolahan minyak sawit (B).

Tujuan penelitian yang dilakukan adalah mengetahui efisiensi penyisihan H_2S dan NH_3 melalui proses biofiltrasi, serta evaluasi pemodelan profil unjuk kerja biofilter berdasarkan kondisi mikrostatik biofilm

¹⁾ Departemen Teknik Lingkungan Institut Teknologi Bandung

²⁾ Departemen Teknik Kimia Institut Teknologi Bandung

Jl. Ganesha 10 Bandung 40132

Fax. (022) 2530704, E-mail: dsuwardin04@yahoo.com

dan proses degradasi yang dikendalikan oleh reaksi biokimia sel, serta model neraca substrat sepanjang reaktor yang melibatkan proses konveksi-difusi-reaksi (KDR).

Metode Penelitian

Reaktor biofilter

Percobaan dilakukan di dalam biofilter sinambung berdiameter 11 cm dengan tinggi total 40 cm. Pada setiap biofilter terdapat tiga titik pengambilan sampel dengan jarak masing-masing 5, 15, dan 25 cm dari plat dasar reaktor.

Media filter yang digunakan ada dua jenis yaitu : media A berupa campuran limbah padat karet dengan tempurung sawit, dan media B berupa limbah serabut sawit. Rangkaian peralatan yang digunakan dalam percobaan sinambung dapat dilihat pada Gambar 1.

Reaktor dipertahankan pada kondisi kelembaban media filter sekitar 70-90% dengan cara melewatkan kontaminan kedalam ruang humidifikasi serta penyiraman media unggun dengan air secara berkala, sedangkan temperatur disesuaikan dengan kondisi ruangan berkisar 20-40°C, dan pH media pada rentang 6 – 8. Kelembaban dan temperatur diukur dengan menggunakan RH meter sedangkan pH diukur dengan menggunakan pH meter. Pengukuran konsentrasi gas H₂S dilakukan dengan metoda metilen biru menggunakan spektrofotometer pada panjang gelombang 660 nm, dan gas NH₃ dengan metode indofenol pada panjang gelombang 630 nm (Methods of Air Sampling and Analysis, 1998).

Pengembangan model

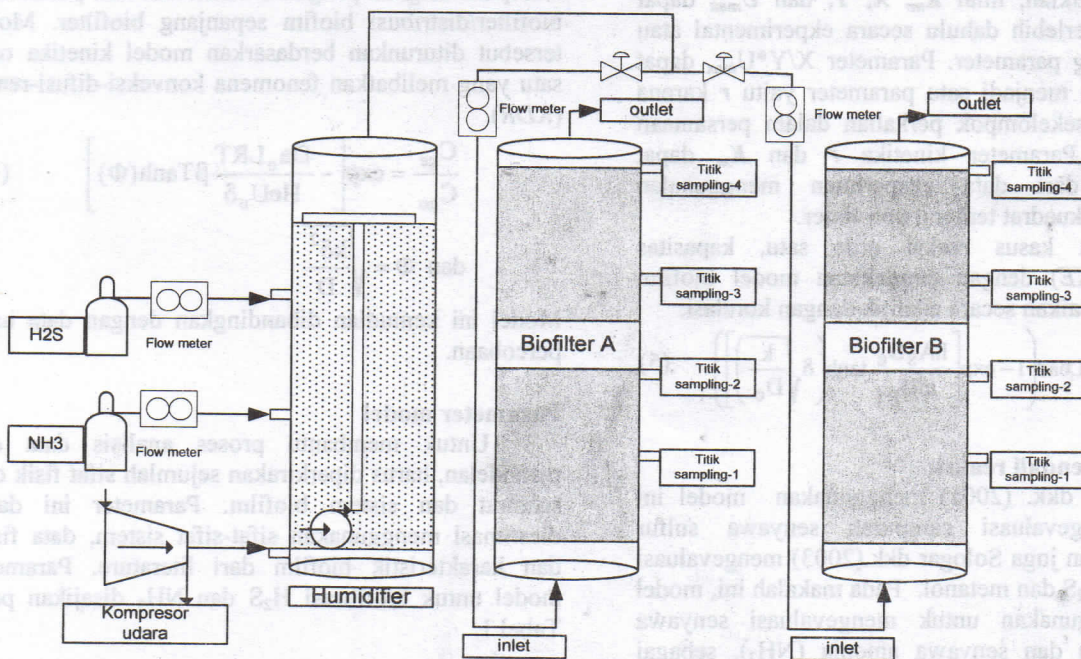
Dalam simulasi pemodelan unjuk kerja biofilter, digunakan dua pendekatan. Pendekatan pertama tinjauan unjuk kerja secara mikro (biofilm) yang meliputi model pendekatan yang digunakan oleh Mohseni dan Allen (2000) yang memperhitungkan laju biodegradasi kontaminan oleh sel dan laju difusi dari fasa gas ke fasa padat dalam biofilm, dan model proses degradasi yang dikendalikan oleh reaksi biokimia sel, dengan menggunakan asumsi bahwa biofilm di seluruh permukaan media bersifat homogen. Model ini pertama kali dikemukakan oleh Hirai dkk (1993). Pada kedua pendekatan tersebut pengaruh adanya fasa cair terhadap biodegradasi dan difusi dalam lapisan film diabaikan.

Pendekatan kedua adalah memodelkan profil unjuk kerja biofilter berdasarkan ketinggian unggun filter. Dalam hal ini digunakan pendekatan empirik yaitu model KDR yang dikembangkan oleh Ottengraf dan van der Oever (1983).

Model biofilm

Mohseni dan Allen (2000) mengembangkan model untuk praperlakuan α -pinen dan methanol berdasarkan pada model biofisik biofilm yang dikeluarkan oleh Ottengraf dkk (1983). Model tersebut berdasarkan pada asumsi bahwa:

- ❖ Reaksi mengikuti kinetika Monod
- ❖ Operasi dalam biofilter dianggap seperti reaktor aliran sumbat tanpa ada dispersi kecepatan kearah aksial.
- ❖ Pertumbuhan biofilm pada permukaan media unggun bersifat homogen, dan
- ❖ Ketersediaan nutrisi sel selain senyawa kontaminan berlebih sehingga faktor pembatas adalah senyawa kontaminan.



Gambar 1. Rangkaian peralatan pada percobaan sinambung

Model tersebut dapat diadaptasi untuk kontaminan H₂S dan NH₃ dalam bentuk korelasi persamaan. Neraca massa di dalam biofilm pada keadaan tunak untuk sistem dengan dua kontaminan sebagai berikut:

$$D_{e,H_2S} \frac{d^2 S_{H_2S}}{dx^2} = \alpha \frac{X_{H_2S}}{Y_{H_2S}} \frac{\mu_{max,H_2S} S_{H_2S}}{K_{m,H_2S} + S_{H_2S}} \quad (1)$$

$$D_{e,NH_3} \frac{d^2 S_{NH_3}}{dx^2} = \beta \frac{X_{NH_3}}{Y_{NH_3}} \frac{\mu_{max,NH_3} S_{NH_3}}{K_{m,NH_3} + S_{NH_3}} \quad (2)$$

Kondisi batas dari persamaan diatas adalah:

$$S_{H_2S} = \frac{C_{H_2S}}{m_{H_2S}} \text{ dan } S_{NH_3} = \frac{C_{NH_3}}{m_{NH_3}} \text{ pada } x=0$$

$$\frac{dS_{H_2S}}{dx} = 0 \text{ pada } x = \delta_{H_2S}$$

$$\text{dan } \frac{dS_{NH_3}}{dx} = 0 \text{ pada } x = \delta_{NH_3}$$

Neraca massa fasa gas pada NH₃ dan H₂S dalam biofilter adalah:

$$U_g \frac{dC_{H_2S}}{dh} = A_s D_{e,H_2S} \left[\frac{dS_{H_2S}}{dx} \right]_{x=0} \quad (3)$$

$$U_g \frac{dC_{NH_3}}{dh} = A_s D_{e,NH_3} \left[\frac{dS_{NH_3}}{dx} \right]_{x=0} \quad (4)$$

dengan U_g merupakan kecepatan linier aliran gas (m/jam), dan A_s merupakan luas permukaan biofilm (m²).

Kondisi batasnya adalah:

$$C_{H_2S} = C_{H_2S,in}$$

$$C_{NH_3} = C_{NH_3,in} \text{ pada } h = 0$$

Sistem empat persamaan diferensial non-linear tersebut dapat diselesaikan menggunakan Matlab. Namun demikian, nilai K_m, X, Y, dan U_{mak} dapat ditentukan terlebih dahulu secara eksperimen atau dengan fitting parameter. Parameter X/Y*U_{max} dapat digabungkan menjadi satu parameter yaitu r karena merupakan sekelompok perkalian dalam persamaan diferensial. Parameter kinetika r dan K_m dapat dicocokkan dari data eksperimen menggunakan pendekatan kuadrat terkecil non-linier.

Untuk kasus reaksi orde satu, kapasitas eliminasi (KE) dengan pendekatan model biofilm dapat diselesaikan secara analitik dengan korelasi:

$$KE = Load \left(1 - \exp \left[\frac{h A_s D_e}{m U_g} \tanh \left(\delta \sqrt{\frac{k}{D_e}} \right) \right] \right) \quad (5)$$

Model pengendali reaksi

Wani dkk. (2001) menggunakan model ini untuk mengevaluasi campuran senyawa sulfur tereduksi, dan juga Sologar dkk.(2003) mengevaluasi campuran H₂S dan metanol. Pada makalah ini, model tersebut digunakan untuk mengevaluasi senyawa sulfur (H₂S) dan senyawa amonia (NH₃), sebagai salah satu metode untuk mengetahui pengaruh

interaksi kehadiran kedua senyawa sebagai kontaminan secara simultan dalam operasi biofilter.

Model ini didasarkan pada neraca substrat sepanjang reaktor menggunakan persamaan model kinetika Monod pada biofilm yang homogen untuk sistem multi kontaminan, dalam hal ini adalah H₂S dan NH₃. Kapasitas eliminasi (KE) dirumuskan sebagai berikut:

$$KE_{H_2S} = \alpha \frac{V_{max} \cdot C_{in,H_2S}}{K_{m,H_2S} + C_{in,H_2S}} \quad (6)$$

$$KE_{NH_3} = \alpha \frac{V_{max} \cdot C_{in,NH_3}}{K_{m,H_2S} + C_{in,NH_3}} \quad (7)$$

$$C_{in} = \frac{C_{in} - C_{out}}{\ln(C_{in} / C_{out})} \quad (8)$$

Untuk biodegradasi yang mengikuti orde satu pada waktu tinggal tertentu, model tersebut juga dapat diselesaikan dalam bentuk parameter laju pembebanan dan kapasitas eliminasi.

$$KE = Load \left(1 - e^{-\frac{kAH}{Q}} \right) \quad (9)$$

Model Konveksi-Difusi-Reaksi (KDR)

Pendekatan menggunakan model biofilm, maupun model pengendali reaksi, hanya menggambarkan fenomena lokal dalam biofilm. Pengembangan model untuk penentuan profil konsentrasi sepanjang biofilm dapat dilakukan melalui dua pendekatan; pendekatan neraca-massa gas kontaminan dalam biofilter (6) dan (7) atau melalui pendekatan empirik. Salah satu model pendekatan empirik yang dapat digunakan adalah model Ottengraf dan Van Der Oever (1983). Model ini memperhitungkan pengaruh distribusi luar permukaan biofilter/distribusi biofilm sepanjang biofilter. Model tersebut diturunkan berdasarkan model kinetika orde satu yang melibatkan fenomena konveksi-difusi-reaksi (KDR).

$$\frac{C_{ge}}{C_{go}} = \exp \left[- \frac{Da_o LRT}{He U_o \delta} \beta \tanh(\Phi) \right] \quad (10)$$

$$\text{dan } \Phi = \sqrt{\frac{k \delta^2}{D}}$$

Model ini kemudian dibandingkan dengan data hasil percobaan.

Parameter model

Untuk membantu proses analisis data dan pemodelan, harus diperkirakan sejumlah sifat fisik dari substrat dan sistem biofilm. Parameter ini dapat diestimasi menggunakan sifat-sifat sistem, data fisik, dan karakteristik biofilm dari literature. Parameter model untuk biofiltrasi H₂S dan NH₃ disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter model biofiltrasi untuk H₂S dan NH₃

Parameter	Simbol	Nilai
Laju alir udara	Q	1,5 l/menit
Diameter reaktor	D	0.14 m
Ketinggian bidang reaktor	H	0.32 m
Fraksi celah unggun	ϵ	0.7
Kecapatan gas	U_g	5.8 m/jam
Luas Permukaan spesifik	A_s	585m ² /m ³
Ketebalan biofilm-Biofilm model, H ₂ S	δ_{H_2S}	1*10 ⁻⁴ m
Ketebalan biofilm-Biofilm model, NH ₃	δ_{NH_3}	1*10 ⁻⁵ m
Densitas biofilm, H ₂ S	X_{H_2S}	100 kg/m ³ biofilm
Densitas biofilm, NH ₃	X_{NH_3}	100 kg/m ³ biofilm
Temperatur	°C	26-28
Faktor Tortortuositas	τ	0.4
Tekanan	P	1 atm
Difusivitas efektif, H ₂ S	D_{eH_2S}	3.4*10 ⁻⁶ m ² /detik
Difusivitas efektif NH ₃	D_{eNH_3}	86*10 ⁻⁶ m ² /detik

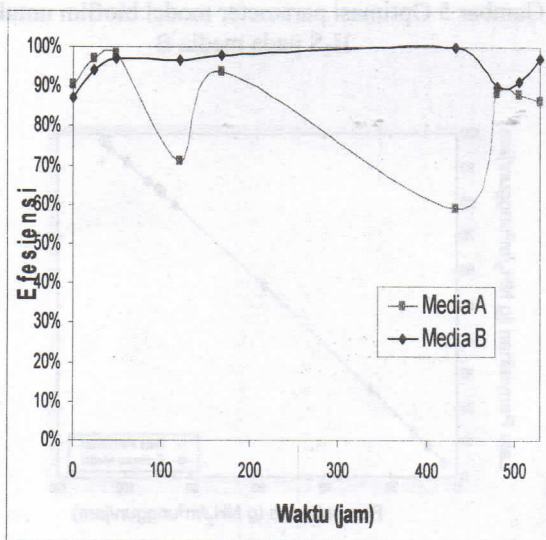
Hasil Dan Pembahasan
Efisiensi penyisihan biofilter

Efisiensi penyisihan yang diperoleh dari percobaan mencapai 99,5 % setelah operasi berlangsung selama sepuluh hari sejak kontaminan gas H₂S dialirkan. Kontaminan gas sintetik dialirkan dengan variasi konsentrasi 10-500 ppmv untuk gas H₂S dan 50-1500 ppmV untuk NH₃, sedangkan laju alir udara yang masuk ke dalam bioreaktor diatur 1,5 liter/menit. Percobaan dilaksanakan pada temperatur ruang antara 24-28 °C.

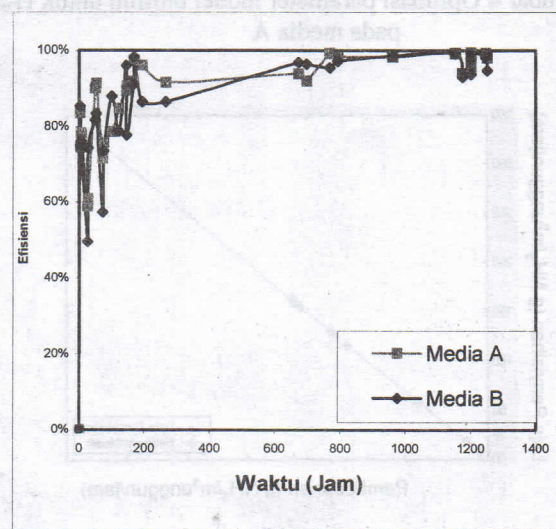
Seperti ditunjukkan pada Gambar 1 dan Gambar 2, efisiensi penyisihan gas H₂S menggunakan kedua jenis media mencapai 99,5 %, dan untuk kontaminan NH₃ 99 % pada media B dan bervariasi pada selang 60-98 % untuk media A. Untuk media

filter yang menggunakan kompos hasil penelitian-penelitian lain yang telah dilakukan menunjukkan hasil yang relatif sama dengan efisiensi penyisihan 60-98% pada selang konsentrasi input dibawah 200 .ppmv (Chung dkk., 2001).

Selama percobaan berlangsung, unjuk kerja kedua media yang digunakan untuk kontaminan H₂S menunjukkan pola yang hampir sama, baik dari efisiensi penyisihan maupun hilang tekan selama operasi. Namun demikian, untuk kontaminan NH₃, selama operasi terjadi penurunan unjuk kerja akibat variasi beban secara mendadak yang menyebabkan terjadinya deaktivasi mikroorganisme yang aktif. Mikroorganisme non-aktif tersebut dapat diaktifkan kembali dengan cepat (kurang dari dua jam) dengan melakukan pencucian media filter.



Gambar 2. Efisiensi penyisihan NH₃ pada biofilter



Gambar 3. Efisiensi penyisihan H₂S pada biofilter

Biofiltrasi Simultan H₂S dan NH₃: Pendekatan model biofilm

Berdasarkan model biofilm yang dikembangkan oleh Mohseni dan Allen (2000), laju degradasi kontaminan dapat dimodelkan secara mikroskopis dengan mengembangkan persamaan (5) dari neraca massa pada biofilm. Optimasi parameter dengan menggunakan Matlab dari model tersebut dilakukan untuk memodelkan laju penyisihan kontaminan pada berbagai variasi pembebanan.

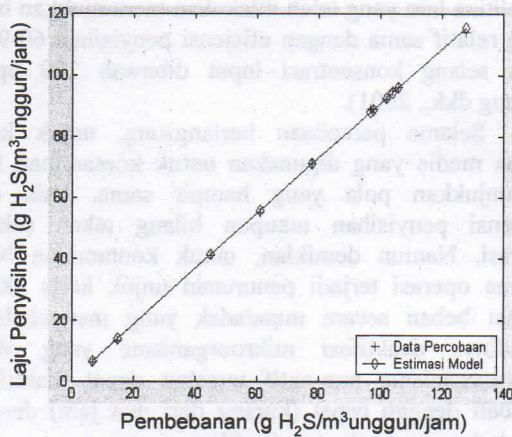
Hasil pemodelan menunjukkan bahwa model tersebut sangat sesuai dengan data hasil percobaan. Baik untuk kontaminan H₂S (Gambar 4 dan 5) maupun kontaminan NH₃ (Gambar 6 dan 7). Data hasil percobaan dan data yang diperoleh dari estimasi menggunakan model menunjukkan bahwa kinetika degradasi dari kontaminan H₂S dan NH₃ adalah reaksi orde satu. Hal ini terlihat dari grafik profil laju penyisihan terhadap pembebanan yang cenderung linear. Hasil ini diperoleh untuk kedua jenis kontaminan dan kedua jenis media yang digunakan dalam percobaan ini.

Simulasi profil konsentrasi kontaminan dalam biofilm

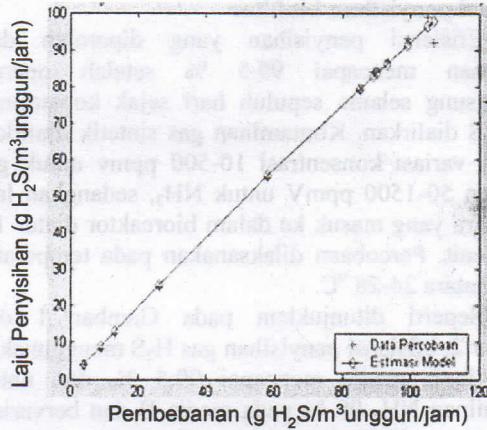
Integrasi persamaan (1) dan (2) dapat digunakan untuk melakukan simulasi mekanisme biodegradasi dalam biofilter, apakah laju biodegradasi dikendalikan oleh difusi ke dalam biofilm atau dikendalikan oleh reaksi biokimia mikroorganisme. Parameter-parameter yang terdapat dalam perhitungan disesuaikan dengan kondisi operasi dan data literatur untuk masing-masing kontaminan.

Hasil simulasi untuk H₂S dengan konsentrasi input 120 g/m³ menunjukkan bahwa sampai pada kedalaman biofilm $x=\delta$, masih terdapat konsentrasi H₂S yang cukup tinggi, 112 ppmv (Gambar 8). Ini menunjukkan bahwa tidak terjadi hambatan yang berarti akibat proses difusi H₂S ke dalam biofilm.

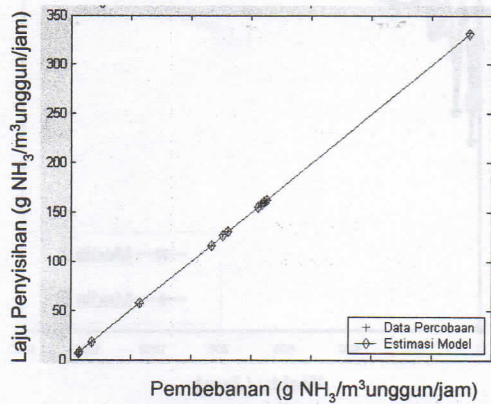
Fenomena yang terjadi adalah terjadinya keterbatasan laju reaksi (*removal rate*) dari reaksi biokimia sel untuk mendegradasi kontaminan H₂S. Fenomena ini ternyata menunjukkan hal yang sama dengan NH₃.



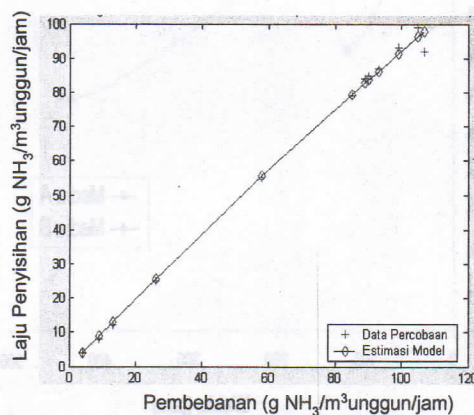
Gambar 4 Optimasi parameter model biofilm untuk H₂S pada media A



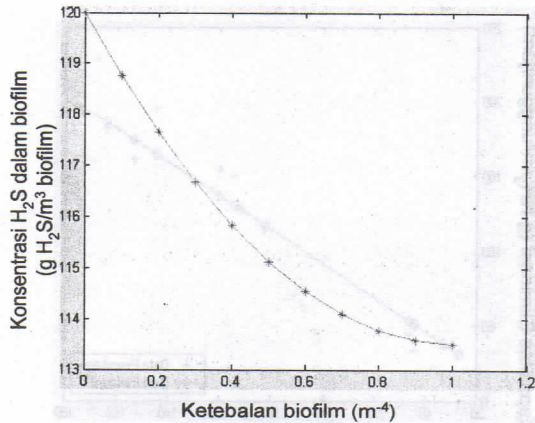
Gambar 5 Optimasi parameter model biofilm untuk H₂S pada media B



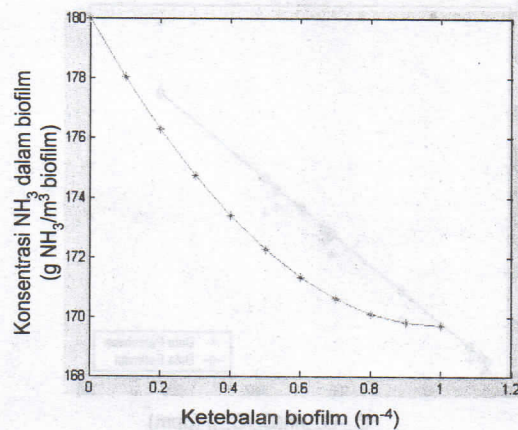
Gambar 6 Optimasi parameter model biofilm untuk NH₃ pada media A



Gambar 7. Optimasi parameter model biofilm untuk NH₃ pada media B



Gambar 8 Profil konsentrasi kontaminan H₂S dalam biofilm



Gambar 9. Profil konsentrasi kontaminan NH₃ dalam biofilm

Dengan konsentrasi input 180 g/m³ pada kedalaman biofilm $x=\delta$, masih terdapat konsentrasi NH₃ yang cukup tinggi, 170 ppmv (Gambar 9). Ini menunjukkan bahwa tidak terjadi hambatan yang berarti akibat proses difusi NH₃ ke dalam biofilm.

Grafik hasil optimasi menunjukkan bahwa model persamaan pembatas reaksi sesuai dengan data hasil percobaan (Gambar 9-12).

Biofiltrasi Simultan H₂S dan NH₃ : Pendekatan model pembatas-reaksi

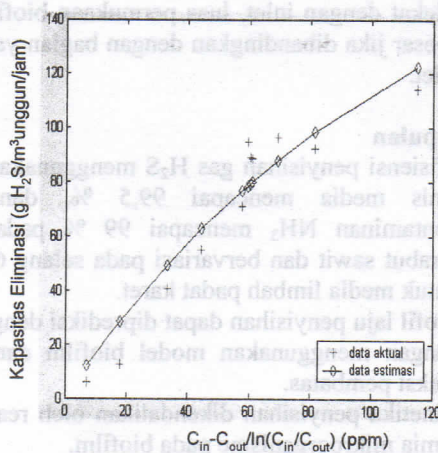
Berdasarkan evaluasi melalui model biofilm, laju biodegradasi kontaminan dalam biofilter dikendalikan oleh laju reaksi yang ditunjukkan dengan persamaan (6) dan (7). Oleh karena itu, evaluasi menggunakan model pembatas reaksi dinilai cukup cocok. Hal ini dikarenakan model ini dikembangkan atas asumsi bahwa faktor pengendali biodegradasi adalah reaksi biokimia sel untuk mendegradasi kontaminan.

Tabel 2. Parameter Kinetika V_m dan K_m

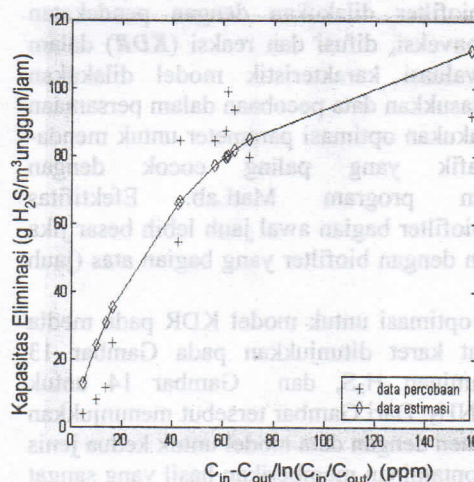
Kontaminan	V_m (g/m ³ /jam)	K_m (ppmv)
H ₂ S media A	310	175
H ₂ S media B	147	52
NH ₃ media A	670	580
NH ₃ media B	570	580

Berdasarkan hasil optimasi parameter model dengan menggunakan program Matlab, diperoleh parameter-parameter kinetika disajikan pada Tabel 2.

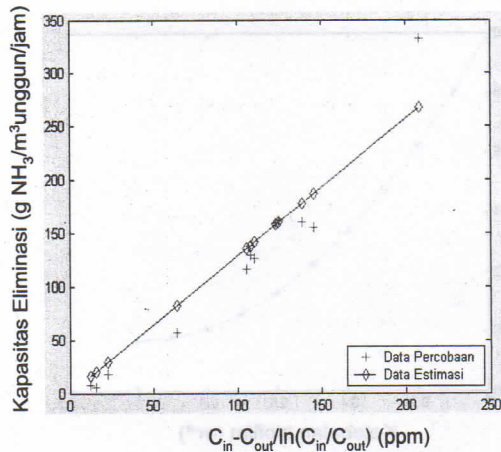
Profil grafik juga menunjukkan bahwa pada rentang konsentrasi kontaminan yang dilakukan, ternyata kinetika reaksinya cenderung mengikuti reaksi orde 1, baik untuk kontaminan H₂S maupun untuk kontaminan NH₃. Hal ini diindikasikan dengan profil grafik yang cenderung linear pada rentang konsentrasi input yang digunakan terutama untuk kontaminan NH₃ (Gambar 11 dan 12). Hasil ini cukup konsisten jika dibandingkan dengan pemodelan menggunakan model biofilm.



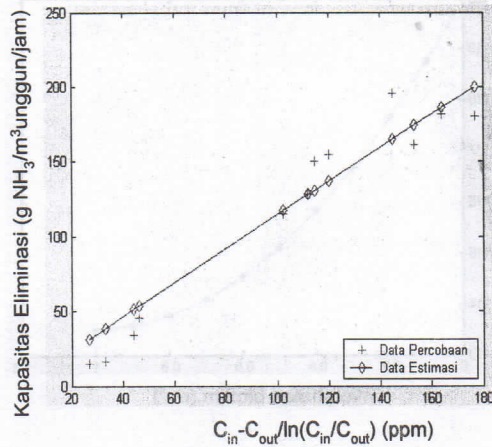
Gambar 9. Optimasi parameter untuk model pembatas reaksi untuk H₂S pada media A



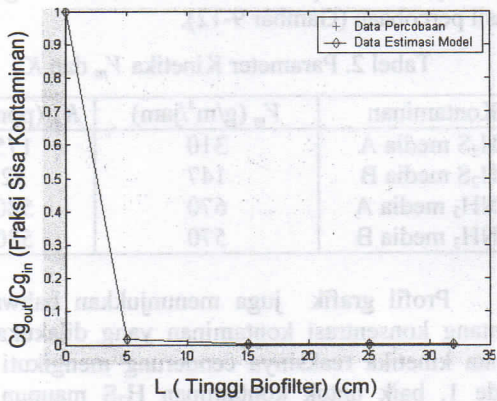
Gambar 10. Optimasi parameter untuk model pembatas reaksi untuk H₂S pada media B



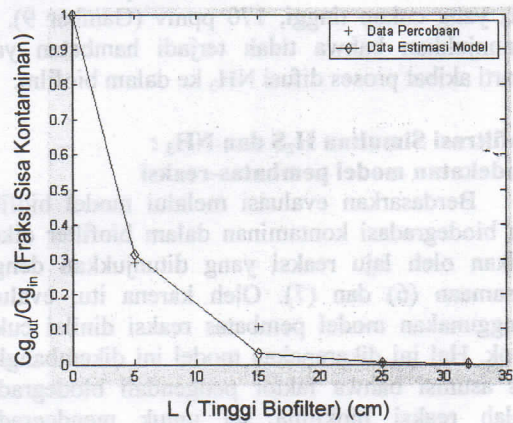
Gambar 11. Optimasi parameter untuk model pembatas reaksi untuk NH₃ pada media A



Gambar 12. Optimasi parameter untuk model pembatas reaksi untuk NH₃ pada media B



Gambar 13. Pemodelan biofilter menggunakan model KDR untuk H₂S pada konsentrasi inlet 307 ppmv



Gambar 14. Pemodelan biofilter menggunakan model KDR untuk NH₃ pada konsentrasi inlet 307 ppmv

Pemodelan profil konsentrasi kontaminan sepanjang biofilter

Pemodelan profil konsentrasi kontaminan sepanjang biofilter dilakukan dengan pendekatan fenomena konveksi, difusi dan reaksi (*KDR*) dalam biofilter. Evaluasi karakteristik model dilakukan dengan memasukkan data percobaan dalam persamaan (10) dan dilakukan optimasi parameter untuk mendapatkan grafik yang paling cocok dengan menggunakan program MatLab. Efektifitas penyisihan biofilter bagian awal jauh lebih besar jika dibandingkan dengan biofilter yang bagian atas (jauh dari inlet).

Hasil optimasi untuk model KDR pada media limbah padat karet ditunjukkan pada Gambar 13 untuk kontaminan H₂S, dan Gambar 14 untuk kontaminan NH₃. Dari Gambar tersebut menunjukkan data eksperimen dengan data model untuk kedua jenis media dan kontaminan memberikan hasil yang sangat dekat. Hal ini mengindikasikan bahwa model KDR dinilai cocok digunakan untuk memprediksi profil

konsentrasi sepanjang biofilter. Dari hasil simulasi model, menunjukkan bahwa terjadi distribusi luas permukaan biofilm sepanjang biofilter. Pada bagian yang dekat dengan inlet, luas permukaan biofilm jauh lebih besar jika dibandingkan dengan bagian yang jauh dari inlet.

Kesimpulan

- Efisiensi penyisihan gas H₂S menggunakan kedua jenis media mencapai 99,5 %, dan untuk kontaminan NH₃ mencapai 99 % pada media serabut sawit dan bervariasi pada selang 60-98 % untuk media limbah padat karet.
- Profil laju penyisihan dapat diprediksi dengan baik dengan menggunakan model biofilm dan model reaksi pembatas.
- Kinetika penyisihan dikendalikan oleh reaksi biokimia mikroorganisme pada biofilm.
- Kinetika reaksi merupakan kinetika reaksi orde satu.

- Model KDR dinilai sesuai untuk memprediksi profil konsentrasi kontaminan sepanjang biofilter

Daftar Notasi

- D_e = koefisien difusifitas efektif, (m^2/jam),
- S = konsentrasi substrat dalam biofilm, (g/m^3)
- x = dimensi sepanjang biofilm, (m)
- X = densitas biofilm, (kg/m^3)
- Y = koefisien perolehan biofilm, (g/g)
- μ_{max} = laju maksimum pertumbuhan spesifik, (h^{-1})
- K_m = konstanta monod, (g/m^3)
- m = koefisien partisi udara cair
- δ = ketebalan biofilm, (m).
- C_{ge} = konsentrasi efluen, (mol/m^3)
- C_{go} = konsentasi inlet gas, (mol/m^3)
- D = koefisien difusi pada fasa cair, ($m^2/detik$)
- H_e = konstanta Henry (m^3/mol),
- T = temperatur, (K)
- R = konstanta gas ideal, ($Pa\ m^3/mol/K$)
- k = konstanta laju reaksi ($detik^{-1}$) dan
- Φ = modulus thiele.
- V_{max} = laju penyisihan maksimum ($g/m^3\ filter\ media/jam$),
- K_m = konstanta monod, (g/m^3).
- C = konsentrasi substrat pada fasa gas, (g/m^3),
- α, β = parameter interaksi empiris berdasarkan eksperimen.
- k = konstanta laju reaksi orde 1 (s^{-1}),
- A = luas permukaan bidang tegak lurus aliran, (m^2)
- H = tinggi biofilter, (m)
- h = jarak terhadap inlet biofilter, (m)
- Q = laju alir udara melalui biofilter, (m^3/s).

Daftar Pustaka

Chung, Y.; Huang C.; Tseng, C. (2001), "Biological Elimination of H_2S and NH_3 from Wastegas by Biofilter Packed with Immobilized Heterotropic Bacteria", *Chemosphere*, 43, pp 1043-1050.

Deshusses M. A., (1994), "Biodegradation of Mixtures of Ketone Vapours in Biofilters for The Treatment of Waste Air", *Dissertation*, Swiss Federal Institute of Technology Zurich.

Diks, R.M.M., dan S.P.P. Ottengraf. (1991). "Verification studies of a simplified model for the removal of dichloromethane from waste gases using a biological trickling filter", *Parts I and II, Bioproc. Engin.* 6 : 93-99;131-140.

Eweis, J.B. , S.J. Ergas, D.P.Y. Chang, dan E.D. Schroeder. (1998). "Bioremediation Principles". McGraw-Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering.

Hirai, M., M. Ohtake, dan M.Shoda (1990), "Removal Kinetic of Hydrogen Sulfide, Methanotiol and Dimetil Sulfide by Peat Biofilter", *Journal of Fermentation and Bioengineering.* 70, 5. pp 334-339.

Mohseni, M. dan D. G. Allen. (2000), "Biofiltration of mixtures of Hydrophilic and Hydrophobic Volatil Organics Compounds", *Chemical Bioengineering Science*, 55, pp.1545-1558.

Ottengraf, S.P.P dan A.H.C. van den Oever. (1983). "Kinetic of Organic Compound Removal from Waste Gases with a Biological Filter", *Biotech. and Bioeng.*, 25, pp 3089-3102.

Shareefdeen, Z., Baltzis, O. Young-Sook, dan R. Bartha. (1993), "Biofiltration of methanol vapor". *Biotechno. Bioeng.* 41 : 512-524.

Sologar, V.S. Lu-Zijin, dan D.G. Allen (2003) "Biofiltration of Concentrated Mixtures of Hydrogen Sulfide and Methanol", *Environmental Progress* Vol 22 No.2. pp 129-136.

Wani, A.H., A. K. Lau, dan R.K. Bransion. (1999), "Effect of Periode Starvation and Fluctuating Hydrogen Sulfide Concentration by Biofilter Dynamic and Performance", *J. Hazardous Materials*, 60 : 287-303.