

SIMULASI PENGARUH KONSENTRASI BIOMASSA PADA LUMPUR AKTIF TERHADAP PENYISIHAN COD DALAM BIOREAKTOR MEMBRAN TERENDAM

A. E. Palupi, Nurmuafix, S. A. Hastono, M. A. Syukur, A. Widjaja dan A. Altway^{*)}

Abstrak

Proses pengolahan limbah cair dengan bioreaktor membran terendam (BRMt), mempunyai banyak keuntungan dibandingkan proses lumpur aktif konvensional, karena prosesnya lebih sederhana, tidak memerlukan bak sedimentasi sekunder dan kandungan solid dalam efluen (permeat) hampir tidak ada. Dalam proses ini melibatkan tiga fasa yaitu padat (biomassa dan komponen-komponen limbah), cair (air) dan gas (udara untuk aerasi), dimana degradasi biologis yang terjadi sangat dipengaruhi oleh transfer massa lintas membran, sehingga diperlukan analisa teoritis terhadap proses degradasi limbah pada BRMt dengan model matematis yang dapat menjelaskan fenomena sistemnya, yaitu laju degradasi limbah (S_S dan X_S), laju pertumbuhan biomassa heterotrop (X_{BH}), laju pembentukan SMP (soluble microbial product), kelarutan oksigen (S_O), dan jumlah senyawa organik inert (S_I dan X_I). Penelitian ini bersifat simulasi yang menggabungkan antara model matematis aktivitas biologis dan performance membran menjadi satu model yang dapat digunakan untuk menghitung COD total pada setiap waktu. Hasil simulasi divalidasi dengan hasil analisa laboratorium dengan limbah cair domestik sintesis sebagai umpan. Secara teoritis, proses degradasi limbah BRMt terdiri dari tujuh komponen yang saling terkait yaitu S_S , X_S , X_{BH} , S_{SMP} , S_O , S_I dan X_I . Model matematis yang diperoleh dapat menjelaskan fenomena terjadinya degradasi limbah domestik sintesis dan akumulasi partikulat inert. Simulasi menunjukkan hasil yang cukup bagus untuk memprediksikan pengolahan limbah cair dengan lumpur aktif dan separasi membran dalam satu reaktor. Dibandingkan dengan hasil percobaan, ditemukan nilai parameter baru untuk pengolahan limbah domestik sintesis dengan lumpur aktif, yaitu $Y_H = 0,46$; $\mu_H = 1,5 \text{ hari}^{-1}$; $b_H = 10,5 \text{ hari}^{-1}$; $K_S = 1000 \text{ g COD/m}^3$; $K_{OH} = 0,5 \text{ g O}_2/\text{m}^3$; $K_{SMP} = 15 \text{ g COD/m}^3$.

Kata kunci: aktivitas biologis; BRMt; model simulasi; separasi membran

Pendahuluan

Sistem bioreaktor membran dengan penggabungan proses lumpur aktif dan separasi membran dalam satu unit reaktor, yang lazim disebut bioreaktor membran terendam (BRMt), telah menarik perhatian banyak peneliti karena kelebihanannya yaitu: sistem yang kompak, hemat lahan, biaya operasi rendah, serta hampir tidak mengeluarkan endapan atau sludge (*excess sludge*). Akan tetapi aplikasi sistem BRMt pada skala besar masih sangat jarang dan sulit dilakukan, disebabkan karena belum ada penelitian yang mengkajinya secara komprehensif dan menyeluruh menyangkut aspek teoritis maupun eksperimental dari sistem BRMt ini.

Faktor degradasi biologis maupun faktor transfer massa dari komponen-komponen dalam limbah saling terkait dan harus diperhitungkan secara bersamaan karena distribusi yang tidak merata dalam reaktor akan mengakibatkan akumulasi biomassa atau komponen limbah padat yang lain pada permukaan membran, yang dapat menyebabkan terjadinya penyumbatan pori-pori

membran. Penyumbatan ini sangat mengganggu proses separasi, sehingga hasil degradasi biologis dapat terakumulasi dalam reaktor dan tidak keluar sebagai permeat (*effluent*). Akumulasi biomassa akan meningkatkan konsentrasi produk hasil degradasi biologis di dalam reaktor, dimana konsentrasi yang terlalu tinggi akan mengganggu proses degradasi biologis yang terjadi. Yamamoto, dkk., (1989), adalah orang pertama yang melakukan penelitian tentang BRMt *hollow fiber*. Unjuk kerja BRMt pada proses lumpur aktif juga dilakukan oleh Michal Bodzek (1996), menggunakan membran tubular ultrafiltrasi dari bahan polyacrylonitril (PAN). Witzig dkk., (2002), membuktikan adanya perubahan struktur lumpur aktif di BRMt bahkan pada kondisi influen konstan dalam jangka waktu yang panjang. Flok yang umum dijumpai pada proses lumpur aktif konvensional tidak ditemukan pada BRMt (Cicek dkk., 1999), dan mengamati pengaruh pencampuran terhadap kinerja bioreaktor yang menfokuskan pada pertumbuhan mikroorganisme. Dalam penelitiannya,

^{*)} Jurusan Teknik Kimia FTI-ITS
Kampus ITS Keputih Sukolilo –Surabaya 60111, Indonesia
Telp. (031) 5946240 ext.303, Fax. (031) 5999282,
E-mail: aisyahep2000@yahoo.com ; tekbiolab@chemeng.its.ac.id

ditemukan sejumlah mikroba berfilamen, nematoda, dan ciliata yang relatif lebih sedikit dibandingkan dengan mikroba pada proses lumpur aktif yang beroperasi pada umur lumpur 20 hari. Hal ini disebabkan oleh variasi kondisi seperti gaya geser, transfer massa, pengadukan, dan tidak adanya bak sedimentasi pada BRMt. Penelitian yang dilakukan oleh Ghyoot dan Verstraete (2000), menunjukkan bahwa konsentrasi yang tinggi pada BRMt menumbuhkan protozoa khususnya flagelata dan ciliata yang berperan sebagai pengendali populasi bakteri dan sangat membantu menurunkan BOD efluen. Hal lain yang cukup penting pada BRMt adalah pemisahan biomassa dari efluen dapat menghasilkan kualitas efluen yang tinggi.

Hasil-hasil penelitian tersebut di atas, cukup membuktikan bahwa BRMt mempunyai banyak keuntungan untuk proses pengolahan limbah cair, didukung dengan kombinasi proses lumpur aktif. Namun demikian, sebagian besar adalah secara eksperimental. Penelitian secara teoritis tentang BRMt belum banyak dilakukan. Mengingat pemodelan (simulasi) mempunyai banyak keuntungan diantaranya adalah dapat memprediksi hasil dan proses pengolahan tanpa melakukan eksperimen, sehingga biaya dan waktu yang diperlukan dapat diperkecil.

Kekompleksan sistem dan keterkaitan antara proses biologis dengan transfer massa di dalam reaktor maupun transfer massa lintas membran akan dapat diklarifikasi dengan baik apabila dilakukan analisa teoritis yang komprehensif dan menyeluruh dengan cara membuat model matematis. Analisa ini sangat diperlukan untuk mendesain unit bioreaktor yang efektif dan efisien serta dapat dijadikan dasar dalam melakukan evaluasi terhadap kinerja BRMt ini. Penelitian ini bertujuan untuk membuat suatu model analisis teoritis pada sistem pengolahan limbah cair dengan asumsi aliran yang terjadi tercampur sempurna (aliran ideal).

Pengembangan Model

Bentuk aktivitas biologis yang dilakukan biomassa dalam lumpur aktif bermacam-macam. Lu S.G. dkk. (2001), mendapatkan sepuluh proses fundamental yang dilakukan oleh biomassa. Sepuluh aktivitas tersebut mempunyai peranan masing-masing dalam menjelaskan fenomena yang terjadi di dalam lumpur aktif, diantaranya laju proses degradasi, produk degradasi, pembentukan senyawa organik *soluble* maupun partikulat, pertumbuhan, dan perkembangan biomassa.

Pengembangan model yang dilakukan disini adalah menggantikan laju alir efluen (Q_E) dengan fluks yang terdiri dari empat parameter operasi utama, yaitu tekanan, konsentrasi umpan, temperatur, serta laju alir dan turbulensi dalam saluran umpan.

Lee Yonghun., dkk (2002) mengenalkan hubungan linear antara fluks dan tekanan pada persamaan berikut. Persamaan ini digunakan untuk mendiskripsikan terjadinya fouling pada membran.

$$J = \frac{\Delta P}{\mu R} \quad (1)$$

J adalah fluks (permeat) yang melalui membran pada driving force $\Delta P/R$, dengan ΔP beda tekanan (Pa), R adalah tahanan total membran akibat fouling (m^{-1}), μ adalah viskositas permeat (Pa.s), dimana hambatan total akibat fouling adalah sebagai berikut.

$$R = R_m + m\alpha \quad (2)$$

R_m adalah hambatan mula-mula sebelum membran digunakan (m^{-1}), m adalah massa partikulat yang terakumulasi pada permukaan membran (kg/m^2), α adalah hambatan spesifik (m/kg). Harga m dapat diperoleh dari persamaan (3) berikut.

$$m = k_m \frac{V_P X_{TSS}}{A} \quad (3)$$

k_m adalah efisiensi akibat pengaruh crossflow, V_P adalah volume permeat yang melewati membran (m^3), X_{TSS} adalah total partikulat (total suspended solid) (kg/m^2) dan A adalah luas permukaan membran (m^2). Nilai k_m dapat diperoleh dari persamaan Boequet S., dkk., (2005), dimana:

$$k_m = \frac{\varepsilon D_s}{\tau \delta} \quad (4)$$

ε adalah porositas membran, D_s adalah diameter inside (m), τ adalah tortuosity, δ adalah tebal membran (m). V_P merupakan fungsi dari laju alir efluen terhadap waktu.

$$V_P = Q_E \times t \quad (5)$$

Sedangkan X_{TSS} merupakan penjumlahan dari partikulat substrat (X_s), biomassa (X_{BH}), dan partikulat inert (X_I)

$$X_{TSS} = X_s + X_{BH} + X_I \quad (6)$$

Persamaan (1) sampai dengan (6) disubstitusikan ke persamaan aktifitas biologis yang diperoleh dari penelitian Lu S.G., dkk. (2001). Persamaan yang diperoleh sesuai dengan kondisi penelitian yang juga dilakukan secara eksperimen. Dari persamaan tersebut diperoleh empat proses (aktifitas biologis) utama dengan tujuh komponen yang berperan dalam mendegradasi limbah yaitu pertumbuhan biomassa heterotrop secara aerobik, terbentuknya partikulat biomassa heterotrop akibat kematian, terbentuknya BAP biomassa heterotrop akibat kematian, hidrolisis partikulat senyawa organik yang tidak dapat melewati membran. Sedangkan komponen-komponen yang berperan dalam proses degradasi limbah yaitu: soluble substrat (S_s), partikulat substrat (X_s), biomassa (X_{BH}), produk mikroba terlarut (S_{SMP}), oksigen terlarut (S_o), soluble inert (S_i), dan partikulat inert (X_I). Persamaan neraca massa masing-masing komponen dalam BRMt adalah sebagai berikut (Tabel 1).

Akumulasi massa komponen = massa komponen masuk – massa komponen keluar +
 massa komponen terbentuk – massa komponen terdegradasi

Tabel 1. Persamaan Neraca Massa

$$V \left(\frac{dS_s}{dt} \right) = Q_o * S_s^0 - \left\{ \mu * \left[R_m + \left(\frac{\varepsilon * D_s}{\tau * \delta} \right) * \left(\frac{Q_E * t * (X_s + X_{BH} + X_I)}{1000 * A} \right) * \alpha \right] \right\} * A * S_s * 86400 - Q_w * S_s - \left(\frac{1}{Y_H} \right) * \left[\mu_H * \left(\frac{S_s}{K_S + S_s} \right) * \left(\frac{S_O}{K_{OH} + S_O} \right) * X_{BH} \right] * V \quad (7)$$

$$V \left(\frac{dX_s}{dt} \right) = Q_o * X_s^0 - Q_w * X_s + (1 - f_p) * (b_H * X_{BH}) * V - K_H \frac{X_s}{K_X + \left(\frac{X_s}{X_{BH}} \right)} \left[\left(\frac{S_O}{K_{OH} + S_O} \right) + \eta_h \left(\frac{K_{OH}}{K_{OH} + S_O} \right) \right] * X_{BH} * V \quad (8)$$

$$V \left(\frac{dX_{BH}}{dt} \right) = Q_o * X_{BH}^0 - Q_w * X_{BH} + \left[\mu_H * \left(\frac{S_s}{K_S + S_s} \right) * \left(\frac{S_O}{K_{OH} + S_O} \right) * X_{BH} \right] * V + \left[\mu_{SMP} * \left(\frac{S_{SMP}}{K_{SMP} + S_{SMP}} \right) * \left(\frac{S_O}{K_{OH} + S_O} \right) * X_{BH} \right] * V - b_H * X_{BH} * V - b_{BAP,H} * X_{BH} * V \quad (9)$$

$$V \left(\frac{dS_{SMP}}{dt} \right) = Q_o * S_{SMP}^0 - \left\{ \mu * \left[R_m + \left(\frac{\varepsilon * D_s}{\tau * \delta} \right) * \left(\frac{Q_E * t * (X_s + X_{BH} + X_I)}{1000 * A} \right) * \alpha \right] \right\} * A * S_{SMP} * 86400 - Q_w * S_{SMP} + \gamma_{UAP,H} * \left[\mu_H * \left(\frac{S_s}{K_S + S_s} \right) * \left(\frac{S_O}{K_{OH} + S_O} \right) * X_{BH} \right] * V + \left(\gamma_{UAP,H} - \frac{1}{Y_{SMP}} \right) * V * \left[\mu_{SMP} * \left(\frac{S_{SMP}}{K_{SMP} + S_{SMP}} \right) * \left(\frac{S_O}{K_{OH} + S_O} \right) * X_{BH} \right] * V + (1 - f_B) * \left[b_{BAP,H} * X_{BH} + K_h \frac{X_s}{K_X + \left(\frac{X_s}{X_{BH}} \right)} \left[\left(\frac{S_O}{K_{OH} + S_O} \right) + \eta_h \left(\frac{K_{OH}}{K_{OH} + S_O} \right) \right] * X_{BH} \right] * V \quad (10)$$

$$\left(\frac{dS_O}{dt} \right) = \left(\frac{1,2 * 10^4 + 0,01 * Q + 0,018 * Q^2}{60} \right) * \left(\frac{P_{O_2}}{H_{O_2}} - S_O \right) * 86400 * V - \frac{1 - Y_H}{Y_H} * V - \frac{1 - Y_{SMP}}{Y_{SMP}} * \left[\mu_H * \left(\frac{S_s}{K_S + S_s} \right) * \left(\frac{S_O}{K_{OH} + S_O} \right) * X_{BH} \right] * V + \left[\mu_{SMP} * \left(\frac{S_{SMP}}{K_{SMP} + S_{SMP}} \right) * \left(\frac{S_O}{K_{OH} + S_O} \right) * X_{BH} \right] * V \quad (11)$$

$$V \left(\frac{dS_I}{dt} \right) = Q_o * S_I^0 - \left\{ \mu * \left[R_m + \left(\frac{\varepsilon * D_s}{\tau * \delta} \right) * \left(\frac{Q_E * t * (X_s + X_{BH} + X_I)}{1000 * A} \right) * \alpha \right] \right\} * A * S_I * 86400 - Q_w * S_I + f_B * b_{BAP,H} * X_{BH} * V \quad (12)$$

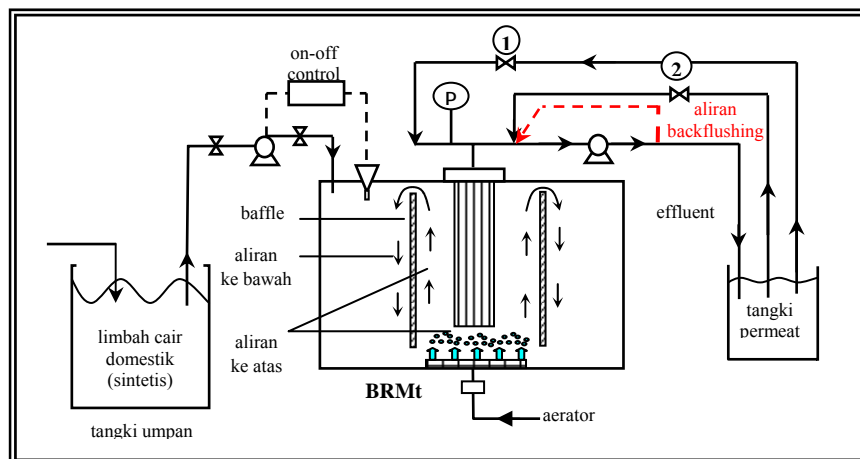
$$V \left(\frac{dX_I}{dt} \right) = Q_o * X_I^0 - Q_w * X_I + f_p * b_H * X_{BH} * V \quad (13)$$

Tabel 2. Nilai Parameter Stokimetri, Kinetik, dan Eksperimen

Parameter	Unit	Referensi
<i>Parameter Stokimetri</i>		
$Y_H = 0,46$	g sel COD terbentuk (g COD teroksidasi) ⁻¹	Nilai Estimasi S.G., Lu (2001)
$Y_{SMP} = 0,5$	g sel COD terbentuk (g COD teroksidasi) ⁻¹	Henze et al. (1987)
$f_P = 0,08$	-	S.G., Lu (2001)
$f_B = 0,005$	-	
<i>Parameter Kinetik</i>		
$\mu_H = 1,5$	hari ⁻¹	Nilai Estimasi S.G., Lu (2001)
$\mu_{SMP} = 0,7$	hari ⁻¹	Nilai Estimasi S.G., Lu (2001)
$b_H = 10,5$	hari ⁻¹	Nilai Estimasi S.G., Lu (2001)
$b_{BAP.H} = 0,4$	hari ⁻¹	Nilai Estimasi S.G., Lu (2001)
$k_h = 3,0$	g partikulat biodegradable COD (g sel COD hari) ⁻¹	Henze et al. (1987)
$K_s = 1000$	g COD m ⁻³	Nilai Estimasi
$K_{OH} = 0,5$	g O ₂ m ⁻³	Nilai Estimasi
$K_{SMP} = 15$	g COD m ⁻³	Nilai Estimasi
$K_x = 0,03$	g partikulat biodegradable COD (g sel COD) ⁻¹	Henze et al. (1987)
$\eta_h = 0,4$	-	Henze et al. (1987)
$\gamma_{UAP.H} = 0,38$	-	S.G., Lu (2001)
<i>Parameter Membran</i>		
$\epsilon = 2,8 \times 10^{-7}$	-	karakteristik membran
$D_s = 0,001$	m	karakteristik membran
$\tau = 1,5$	-	karakteristik membran
$\delta = 0,0003$	m	karakteristik membran
$A = 0,8$	m ²	karakteristik membran
$\alpha = 0,5$	m/kg	karakteristik membran
$R_m = 1,8069 \times 10^{12}$	m ⁻¹	karakteristik membran
<i>Parameter Proses</i>		
$V = 0,050$	m ³	
$Q = 8; 12$	liter/menit	
$Q_O = 0,288$	m ³ /hari	
$Q_E = 0,288$	m ³ /hari	
$Q_W = 0$	m ³ /hari	
$H_{O_2} = 0,7567$	atm.mol/m ³	
$P_{O_2} = 0,21$	atm	
$\mu = 0,001$	Pa.s	

Parameter yang digunakan adalah parameter yang memiliki pengaruh perubahan yang besar terhadap hasil pemrograman dengan hasil analisa. Hal ini dilakukan untuk menyesuaikan hasil yang diperoleh dari perhitungan melalui simulasi dengan analisa parameter-

parameter untuk ASM No.1, yang selanjutnya didapatkan parameter-parameter baru yang sesuai dengan penelitian ini. Adapun parameter-parameter yang digunakan pada perancangan model di atas, ditabelkan pada Tabel 2.



Gambar 1. Skema peralatan BRMt

Metode Penelitian

Langkah-langkah estimasi dan validasi parameter pada proses BRMt ini dilakukan dengan menggunakan program MATLAB 6.5 release 13. Tahap awal penelitian adalah data eksperimen yang diperoleh dengan mengoperasikan BRMt dengan lumpur aktifnya dari IPLT Sukolilo dan limbah sintesis dari data modifikasi penelitian Shim, J.K., dkk., (2002) yang kemudian dikemas menjadi model matematik yang mewakili kondisi proses fisik dan biologis di dalam BRMt untuk mendapatkan parameter-parameter model yang selanjutnya digunakan untuk mengestimasi proses biologisnya. Skema peralatan BRMt dalam penelitian ini disajikan pada Gambar 1.

Hasil dan Pembahasan

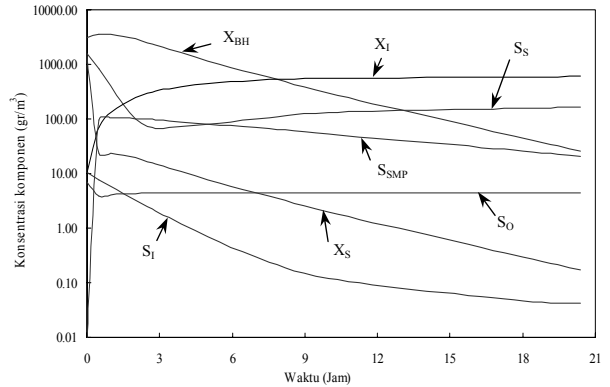
Sepuluh proses fundamental biomassa menurut penelitian Lu S.G., dkk., (2001), hanya ada tujuh dari dua belas bentuk aktivitas biologis yang sesuai dengan penelitian ini yaitu laju pertumbuhan biomassa heterotrop (X_{BH}), soluble substrat (S_s), partikulat substrat (X_s), produk mikroba terlarut (S_{SMP}), oksigen terlarut (S_o), soluble inert (S_i), dan partikulat inert (X_i). Skema laju proses yang diperoleh dapat dilihat pada Gambar 2.

Analisa hasil eksperimen dan estimasi diberikan dalam bentuk grafik yang menunjukkan seberapa jauh kecenderungan kedua hasil tersebut terhadap waktu. Hasil yang diberikan antara lain adalah hubungan konsentrasi komponen, COD total, dan penyisihan COD terhadap waktu pada berbagai konsentrasi MLSS, tekanan lintas membran (TMP), dan kecepatan laju alir udara yang berbeda-beda.

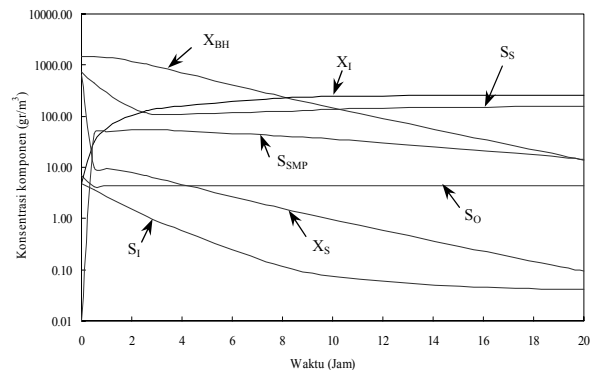
Parameter-parameter kinetik dan stoikiometri sebagian menggunakan hasil penelitian Lu S.G., (2001) disesuaikan dengan penelitian yang dilakukan, sedangkan parameter yang memiliki pengaruh besar terhadap hasil pemrograman, dikembangkan sendiri. Hasil pengembangan program ini diperoleh nilai-nilai baru yang sesuai dengan pengolahan limbah domestik sintesis dalam penelitian ini.

Dari beberapa variabel penelitian yang dikerjakan secara eksperimen dan simulasi, berikut ini

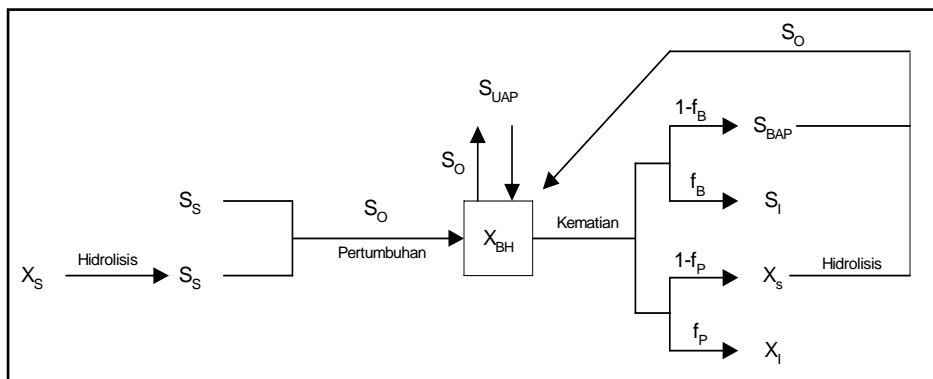
hanya dua variabel yang disajikan dalam bentuk grafik hubungan konsentrasi komponen biomassa terhadap waktu. Gambar 3 dan 4 berikut, menunjukkan hasil simulasi pada konsentrasi biomassa yang berbeda, yaitu 2500 dan 10000 mg/l, dengan perlakuan tekanan dan laju alir udara yang sama.



Gambar 3. Hubungan konsentrasi komponen terhadap waktu, MLSS = 2500 mg/l; $\Delta P=10$ cmHg, laju alir udara = 12 l/menit dari hasil estimasi

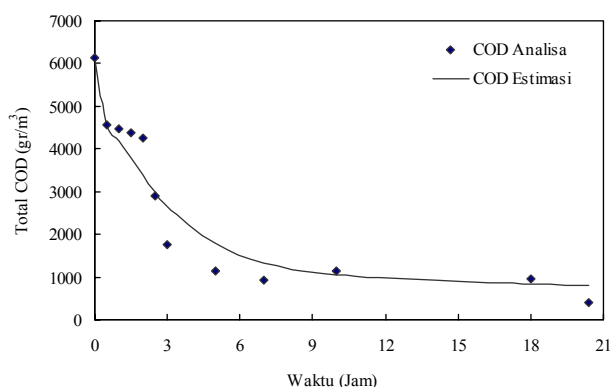


Gambar 4. Hubungan konsentrasi komponen terhadap waktu, MLSS = 10000 mg/l; $\Delta P = 10$ cmHg, laju alir udara = 12 l/menit dari hasil estimasi

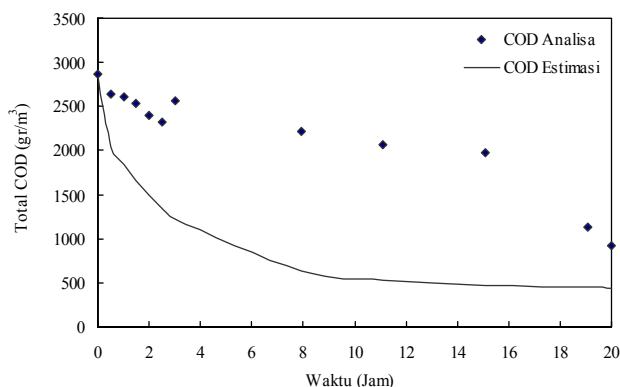


Gambar 2. Skema Laju Proses dalam Lumpur Aktif Hasil Seleksi

Pada gambar 3 dan 4, tampak bahwa jumlah biomassa mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya waktu. Hal ini disebabkan karena jumlah biomassa yang mati semakin bertambah. Kematian mikroba akan berpengaruh pada jumlah produk mikroba terlarut (S_{SMP}). Pada awal operasi ($t=0$), sebelum limbah sintesis (S_S) sebagai umpan diberikan ke dalam tangki, S_{SMP} belum terbentuk. Baru kemudian setelah limbah dimasukkan ke dalam BRMt, biomassa akan segera mendegradasi substrat dan menghasilkan S_{SMP} yang merupakan hasil dari proses degradasi tersebut. Pertumbuhan biomassa akan diiringi dengan bertambahnya S_{SMP} . Namun demikian, setelah satu jam pertama dan seterusnya, terjadi penurunan S_{SMP} walaupun tidak terlalu tajam. Hal ini disebabkan karena jumlah biomassa (X_{BH}) semakin kecil. Komponen lain yang mengalami penurunan dari hasil simulasi ini adalah inert terlarut (S_I), yang disebabkan karena pada saat limbah sintesis (umpan) didegradasi oleh biomassa, dalam waktu yang sama effluen (termasuk S_I), keluar sebagai permeat melalui membran. Ditinjau dari komponen partikulat inert nya (X_I), dengan lamanya waktu operasi, jumlah X_I mengalami kenaikan pula. Hal ini disebabkan karena inert tidak mengalami proses degradasi dan tidak dapat melewati membran, ditambah pula dengan banyaknya biomassa yang mengalami kematian (*decay*). (Lu S.G., dkk, 2001)



Gambar 5. Hubungan COD total terhadap waktu , MLSS = 2500 mg/l; $\Delta P = 10$ cmHg, laju alir udara = 12 l/menit dari hasil estimasi dan analisa

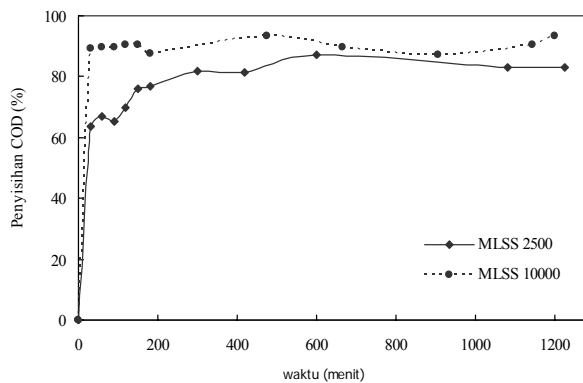


Gambar 6. Hubungan COD total terhadap waktu , MLSS = 10000 mg/l; $\Delta P = 10$ cmHg, laju alir udara = 12 l/menit dari hasil estimasi dan analisa

Grafik 5 dan 6 di atas menyajikan perbandingan total COD, yaitu jumlah COD masing-masing komponen (S_S , X_S , X_{BH} , S_{SMP} , S_I , S_O dan X_I) dari hasil analisa dan estimasi yang terjadi di dalam BRMt, antara tangki dengan konsentrasi biomassa 2500 dan 10000 mg/l.

Dari perbandingan grafik di atas, terlihat bahwa terjadi penyimpangan yang cukup besar pada COD hasil estimasi dan analisa untuk konsentrasi biomassa 10000mg/l (Gambar 6). Penyimpangan ini disebabkan oleh terjadinya *fouling* pada membran (Lee, Y., dkk., 2002), karena pengambilan data secara analisa dalam penelitian ini, tidak menggunakan membran baru. Sedangkan kesesuaian antara hasil estimasi program dengan analisa seperti yang ditunjukkan pada gambar 6, memberikan *error* penyimpangan pada tiap titik terkecil -1,02% dan terbesar 61,15%.

Pada gambar 7 berikut, menunjukkan bahwa hasil analisa pada konsentrasi biomassa 2500 mg/l mempunyai kemampuan menurunkan kadar COD dari limbah sintesis lebih besar daripada konsentrasi biomassa 10000 mg/l. Dalam hal ini membuktikan bahwa dengan konsentrasi biomassa yang tinggi di dalam BRMt, tidak cukup dapat menentukan bahwa persentase penyisihan (% removal) dari COD umpan ke COD permeat juga tinggi. Dibandingkan dengan hasil simulasi antara gambar 5 dan gambar 6, pada konsentrasi biomassa (MLSS) 2500 mg/l juga menunjukkan hasil yang lebih mendekati hasil analisisnya.



Gambar 7. Hubungan penyisihan COD terhadap waktu pada konsentrasi MLSS berbeda (hasil analisa laboratorium)

Kesimpulan

Pada penelitian ini telah dikembangkan model matematis proses degradasi limbah domestik sintesis menggunakan BRMt dengan memperhitungkan aktifitas bakteri heterotrop. Beberapa parameter diadopsi dari penelitian Lu, S.G., dkk., (2001), sedangkan parameter-parameter yang lain merupakan hasil estimasi. Model matematis yang diperoleh dapat menjelaskan dengan baik fenomena yang terjadi di

dalam sistem pada BRMt dengan asumsi aliran yang terjadi tercampur sempurna (aliran ideal).

Daftar Notasi

A	Luas permukaan membran	[m ²]
b _{BAP,H}	Koef. pembentukan BAP heterotrop yang mati	[hari ⁻¹]
b _H	Koef. pembentukan partikulat heterotrop yang mati	[hari ⁻¹]
D _S	Diameter inside membran	[m]
f _B	Fraksi inert biomass produk terlarut	[tak berdimensi]
f _p	Fraksi inert biomass produk partikulat	[tak berdimensi]
H _{O2}	Tetapan Henry O ₂	[atm. mol/ m ³]
J	Fluks	[m.s ⁻¹]
K _h	Koef. hidrolisis	[hari ⁻¹]
K _{L,a}	Koef. transfer massa O ₂	[1/s]
k _m	Eff. karena pengaruh aliran crossflow	[tak berdimensi]
K _{OH}	Koef. oksigen <i>half saturation</i> untuk biomass heterotrop	[gr O ₂ /m ³]
K _S	Koef. substrat <i>half saturation</i> untuk biomass heterotrop	[gr COD/m ³]
K _{SMP}	Koef. produk mikroba terlarut (SMP) <i>half saturation</i> biomass heterotrop	[gr COD/ m ³]
K _X	Koef. <i>half saturation</i> untuk hidrolisis partikulat substrat biodegradable	[tak berdimensi]
m	Akumulasi massa permk. Membran	[kg/m ²]
P _{O2}	Tekanan parsial O ₂ dalam udara	[atm]
Q	Laju alir udara/aerasi	[Liter/menit]
Q _E	Laju alir keluar	[m ³ /hari]
Q ₀	Laju alir masuk	[m ³ /hari]
Q _W	Laju alir <i>wastage</i>	[m ³ /hari]
R	Hambatan total akibat <i>fouling</i>	[1/m]
R _m	Hambatan membran awal	[1/m]
S _I	inert organik terlarut	[gr COD/m ³]
S _O	Oksigen terlarut	[gr O ₂ /m ³]
S _S	Substrat biodegradable terlarut	[gr COD/m ³]
S _{SMP}	Substrat biodegradable terlarut	[gr COD/m ³]
V	Volume reaktor	[m ³]
V _p	Volume permeat	[m ³]
X _{BH}	Biomass heterotrop aktif	[gr COD/m ³]
X _I	Partikulat inert organik matter	[gr COD/m ³]
X _S	Partikulat biodegradasi substrat	[grCOD/m ³]
Y _H	Koef. yield heterotropik dari substrat	[gr COD/gr COD]
Y _{SMP}	Koef. yield heterotropik produk mikroba terlarut (SMP)	[gr COD/gr COD]

Huruf latin

α	Hambatan spesifik	[m/kg]
γ _{UAP,H}	Konstanta pembentukan UAP heterotrop	[tak berdimensi]
δ	Tebal membran	[m]
ΔP	Tekanan lintas membran	[Pa]
ε	Porositas membran	[tak berdimensi]
η _h	Faktor koreksi hidrolisis	[tak berdimensi]

μ	Viskositas permeat	[Pa.s]
μ _H	Laju pertumbuhan spesifik maksimum substrat heterotrop	[hari ⁻¹]
μ _{SMP}	Laju pertumbuhan spesifik maksimum produk mikroba terlarut	[hari ⁻¹]
τ	Tortuosity membran	[tak berdimensi]

Subscript

(^o)	Kondisi awal	[tak berdimensi]
------------------	--------------	------------------

Daftar Pustaka

Bodzek., Michael, Zuzanna Debkowska, Ewa Lobos, and Krystyna Konieczny, (1996), "Biomembran Wastewater Treatment by Activated Sludge Method", *Desalination*. **107**, 83-95

Boequet.S, Torres, A.,Sanchez, J., and Rios, G.M., (2005), "Modeling The Mass Transfer in Solvent-Extraction Processes with Hollow-Fiber Membranes", *AIChE J.*, April 2005, Vol. 51, No.4.

Bredwell MD, Worden RM., (1998), "Mass-transfer properties of Micro-bubbles", *Experimental studies. Department of Chemical Engineering, Michigan State University, East Lansing 48824-1226, USA*

Chriastel L., (1999), "Mass Transfer at Mixing Processes", *J. Periodica Poltechnica Ser. Chem. Eng.* **43**, No.2, 77-87.

Cicek, N., J.P. Franco, M.T. Suidan, V. Urbain, J. Manem, (1999), "Characterization and Comparison of a Membrane Bioreactor and a Conventional Activated-sludge System in The Treatment of Wastewater Containing High-molecular-weight Compounds", *J. Wat. Environ. Res.*, **71**, 64-70.

Fane, A. and Sheng Chang, (2002), "Membrane Bioreactors: Design & Operational Options", *Filtration and Separation J.* 26 June 2002.

Ghyoot. W, W. Verstraete, (2000), "Reduced Sludge Production in a Two-stage Membrane Assisted Bioreactor", *J. Wat. Res.*, **34**, 205-215.

Grady, C.P.L., and Lim, H.C., (1980), "*Biological wastewater treatment – Theory and Application*", Marcel Dekker, Inc., New York.

Henze M., Leslie Grady Jr, C.P., Gujer, W., Marais, G.V.R., Matsuo, T., (1987), "A General Model for Single-Sludge Wastewater Treatment Systems", *J. Wat. Res.*, **21**, No. 5, 505-515.

Lee, Y., Cho J., Seo, Y., Lee, J.W., Ahn, K.H., (2002), "Modeling of Submerged Membrane Bioreactor Process for Wastewater Treatment", *Desalination*. **146**, 451-457.

Lu, S.G., Imai, T., Ukita, M., Sekine, M., Higuchi, T., and Fukugawa, M., (2001), "A model for membrane bioreactor process based on the concept of

formation and degradation of soluble microbial product". *J. Wat., Res.*, **35**, No. 8, 2038-2048.

Mulder, M., (1996), "Basic Principles of Membrane Technology", 2nd Ed., *Kluwer Academic Publishers*, Netherlands.

Shim, J.K., Ik-Keun Yoo, Young Moo Lee, (2002), "Design and operation consideration for wastewater treatment using a flat submerged membrane bioreactor", *Process Biochemistry J.*, **38**, 279-285.

Veenstra, (1995), *Wastewater Treatment*. IHE Delf.

Witzig, Z., W. Manz, S. Rosenberg, U. Kruger, M. Kraume, U. Szewzyk, (2002), "Microbial Aspect of a Bioreactor with Submerged Membranes for Aerobic Treatment of Municipal Wastewater", *J. Water Research*. **36**, 394-402.

Yamamoto, K., M. Hiasa, T. Mahmood, and T. Matsuo, (1989), "Direct Solid-Liquid Separation Using Hollow Fiber Membrane in an Activated Sludge Aeration Tank", *J. Water Science Technology*. **21**, 43-54.