

SIMULASI DAN PEMODELAN PROSES LUMPUR AKTIF TANPA RESIRKULASI LUMPUR PADA KEADAAN TRANSIEN

Budiyono*

ABSTRAK

Permodelan dan simulasi pada keadaan transien dilakukan terhadap sistem pengolahan air limbah dengan proses lumpur aktif tanpa resirkulasi lumpur. Model matematika pada keadaan transien disusun dengan membuat neraca massa substrat dan neraca massa sel. Persamaan yang diperoleh diselesaikan secara numerik. Beberapa parameter yang digunakan untuk penyusunan model yaitu konsentrasi COD umpan 2.000 mg/l dan waktu tinggal cairan (Hydraulic Retention Time, HRT) bervariasi dari 8,16,24 hingga 32 hari. Konsentrasi mikroba (Mixed Liquor Suspended Solid, MLSS) awal divariasikan dari 250,500, 1000 hingga 2000 mg/l. Substrat terlarut awal di dalam bak aerasi divariasikan dari 100,300,500 hingga 1000 mg/l. Parameter kinetika yang digunakan diperoleh dari literatur yaitu laju pertumbuhan maksimum spesifik, laju kematian spesifik, koefisien perolehan sel, dan konstanta setengah jenuh masing-masing $0,589 \text{ hari}^{-1}$, $0,248 \text{ hari}^{-1}$, $0,515 \text{ (mg sel)/(mg substrat)}$, dan 589 mg/l .

Hasil simulasi menunjukkan bahwa waktu yang diperlukan untuk mencapai keadaan tunak tergantung pada HRT dan MLSS awal di dalam bak aerasi. Konsentrasi COD terlarut dan MLSS di dalam bak aerasi pada keadaan transien tergantung pada MLSS dan konsentrasi COD terlarut awal di dalam bak aerasi dan SRT. Dari hasil simulasi ini bisa diambil rule of thumbs bahwa waktu yang diperlukan untuk mencapai keadaan tunak adalah sebesar 1 – 3 kali HRT pada HRT rendah 1 kali HRT pada HRT tinggi.

Kata kunci : simulasi dan pemodelan, proses lumpur aktif, keadaan transien

PENDAHULUAN

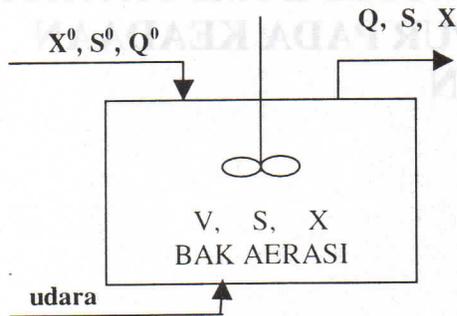
Perlakuan air limbah dengan menggunakan lumpur aktif merupakan salah satu metode pengolahan secara biologi aerob. Pada dasarnya proses lumpur aktif terdiri dari bak aerasi dan bak sedimentasi. Bak aerasi merupakan tempat mikroorganisme untuk mendegradasikan bahan-bahan organik yang ada dalam air limbah. Bak sedimentasi merupakan tempat untuk mengendapkan lumpur hasil proses degradasi di dalam bak aerasi. Lumpur hasil pengendapan di dalam bak sedimentasi diresirkulasikan ke dalam bak aerasi atau sebagian di buang untuk mencegah akumulasi lumpur. Proses lumpur aktif yang sangat sederhana, lumpur dari pengendapan di bak sedimentasi tidak diresirkulasikan kembali ke dalam bak aerasi. Proses lumpur aktif ini mirip dengan reaktor CSTR (Continuous Stirred Tank Reaktor) tanpa resirkulasi.

Penelitian mengenai proses lumpur aktif telah banyak dilakukan. Dari berbagai penelitian terdahulu, masih relatif sedikit informasi mengenai kelakuan

proses pada keadaan transier. Simulasi dan uji model ini dilakukan untuk memperoleh informasi mengenai kelakuan proses pada keadaan transier. Hasil simulasi ini diharapkan bisa digunakan sebagai pedoman untuk menentukan kondisi tunak pada proses pengolahan air limbah. Waktu untuk mencapai keadaan tunak ini diharapkan bisa dijadikan sebagai informasi mengenai waktu yang tepat untuk pengambilan sampel pada penelitian pengolahan air limbah dengan proses lumpur aktif.

PENGEMBANGAN MODEL

Proses lumpur aktif tanpa resirkulasi lumpur dianggap merupakan reaktor CSTR (Continuous Stirred Tank Reaktor) ideal. Diagram alir proses pengolahan air limbah tersaji pada gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir proses lumpur aktif tanpa resirkulasi lumpur

Neraca keseluruhan

Akumulasi = input - output + laju reaksi

Neraca substrat

Laju reaksi pemanfaatan substrat dianggap mengikuti persamaan Monod.

$$V \frac{dS}{dt} = Q^0 S^0 - QS - \frac{k_o SXV}{Y(K_m + S)} \dots\dots (1.a)$$

Karena Q⁰ sama dengan Q, maka persamaan (1.a) bisa disusun kembali menjadi persamaan (1.b) dan (1.c).

$$V \frac{dS}{dt} = Q(S^0 - S) - \frac{k_o SXV}{Y(K_m + S)} \dots\dots (1.b)$$

atau

$$\frac{dS}{dt} = \frac{Q(S^0 - S)}{V} - \frac{k_o SX}{Y(K_m + S)} \dots\dots (1.c)$$

Neraca sel

$$V \frac{dX}{dt} = Q^0 X^0 - QX + \frac{k_o SXV}{(K_m + S)} - k_d XV \dots\dots (2)$$

Bila dianggap aliran umpan tidak mengandung mikroba/MLSS maka X⁰ = 0 maka persamaan (2) bisa disusun menjadi persamaan (2.a) dan (2.b).

$$V \frac{dX}{dt} = \frac{k_o SXV}{(K_m + S)} - k_d XV - QX \dots\dots (2.a)$$

$$\frac{dX}{dt} = \frac{k_o SX}{(K_m + S)} - k_d X - \frac{Q}{V} X \dots\dots (2.b)$$

Berdasarkan definisi waktu tinggal cairan (hydraulic retention time, HRT),

$$\frac{Q}{V} = \frac{1}{HRT} = \frac{1}{\tau} \dots\dots (3)$$

τ = retention time = HRT

Substitusi persamaan (2) ke dalam persamaan (1.c) dan (2.b) memberikan

$$\frac{dS}{dt} = \frac{(S^0 - S)}{\tau} - \frac{k_o SX}{Y(K_m + S)} \dots\dots (4)$$

$$\frac{dX}{dt} = \frac{k_o SX}{(K_m + S)} - k_d X - \frac{X}{\tau} \dots\dots (5)$$

Persamaan (4) dan (5) merupakan persamaan yang menggambarkan konsentrasi substrat keluar (S) dan MLSS pada keadaan transien (*unsteady state*). Bila sistem telah mencapai keadaan tunak (*steady state*), dS/dt dan dX/dt = 0, maka persamaan (4) dan (5) bisa disusun ulang menjadi

$$X = \frac{(S^0 - S)}{\tau} \cdot Y \frac{(K_m + S)}{k_o S} \dots\dots (6)$$

$$S = \frac{(k_d + 1/\tau)K_m}{k_o - k_d - 1/\tau} \dots\dots (7)$$

Persamaan (4) dan (5) merupakan persamaan diferensial orde satu berpasangan. Persamaan tersebut memberikan hubungan S dan X tiap waktu tertentu. Metode penyelesaian yang sederhana adalah menggunakan metode Euler eksplisit (Riggs, 1988).

Metode Euler Eksplisit

Dengan menggunakan metode Euler eksplisit, persamaan (4) dan (5) bisa disusun kembali menjadi

$$S_{i+1} = S_i + \Delta t \left\{ \frac{S^0 - S_i}{\tau} - \frac{k_o S_i X_i}{Y(K_m + S_i)} \right\} \dots (8)$$

$$X_{i+1} = X_i + \Delta t \cdot X_i \left\{ \frac{k_o S_i}{(K_m + S_i)} - k_d - 1/\tau \right\} \dots (9)$$

S_i dan X_i = konsentrasi substrat dan MLSS pada Waktu ke i

S_{i+1} dan X_{i+1} = konsentrasi substrat dan MLSS setelah waktu ke i+1

SIMULASI MODEL

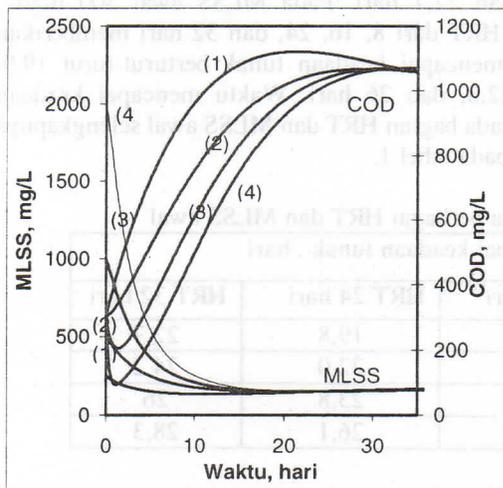
Simulasi model dilakukan untuk mengetahui pengaruh HRT dan kondisi awal terhadap waktu mencapai keadaan tunak. Keadaan tunak dicapai bila konsentrasi MLSS dan COD terlarut mula-mula di dalam bak aerasi. Di samping itu juga akan dikaji dinamika MLSS dan COD terlarut selama keadaan transien. Simulasi dilakukan pada konsentrasi COD umpan 2000 mg/l dan HRT 8, 16, dan 24 hari.

Simulasi – Pemodelan Proses Lumpur Aktif (Budiyono)

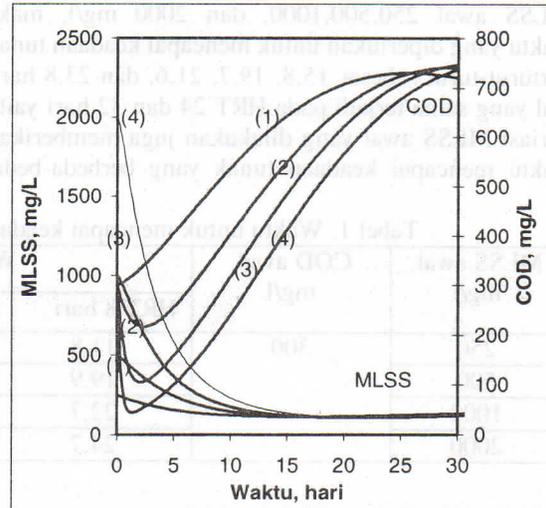
Parameter kinetika yang digunakan di peroleh dari literatur yaitu laju pertumbuhan maksimum spesifikasi, laju kematian spesifikasi, koefisien perolehan sel, dan konstanta setengah jenuh masing-masing $0,589 \text{ hari}^{-1}$, $0,248 \text{ hari}^{-1}$, $0,515 \text{ (mg sel)/(mg substrat)}$, dan 589 mg/l (Budiyono, 1997).

Pengaruh MLSS terhadap waktu mencapai keadaan tunak

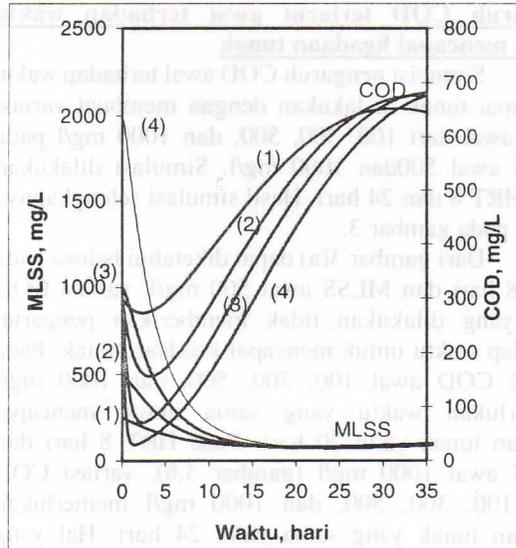
Pengaruh MLSS awal terhadap waktu mencapai tunak di kaji dengan simulasi model pada berbagai MLSS awal. MLSS awal di variasikan yaitu 250,500,1000,dan 2000 mg/l. Simulasi juga divariasikan pada HRT dari 8, 16, 24, hingga 32 hari. Hasil simulasi model tersaji pada gambar 2.



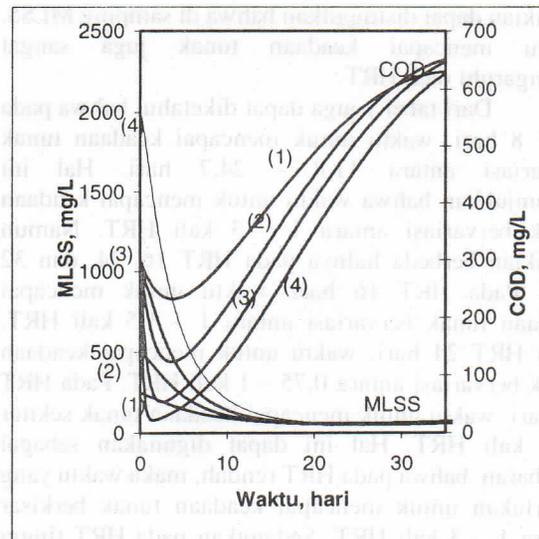
(a). HRT 8 hari



(b). HRT 16 hari



(c). HRT 24 hari



(d). HRT 32 hari

Gambar 2. Pengaruh MLSS awal terhadap waktu mencapai keadaan tunak; COD awal tetap 300 mg/L.

Dari gambar 2 (a) dapat diketahui bahwa pada HRT 8 hari, variasi MLSS awal memberikan waktu mencapai keadaan tunak yang berbeda-beda. Pada MLSS awal 250, 500, 1000, dan 2000 mg/l, maka waktu yang diperlukan untuk mencapai keadaan tunak berturut-turut sebesar 11,8, 19,9, 22,7, dan 24,7 hari. Pada HRT 16 hari (gambar 2.b), variasi MLSS awal yang dilakukan juga memberikan waktu mencapai keadaan tunak yang berbeda-beda. Pada MLSS awal 250,500,1000, dan 2000 mg/l, maka waktu yang diperlukan untuk mencapai keadaan tunak berturut-turut sebesar 15,8, 19,7, 21,6, dan 23,8 hari. Hal yang sama terjadi pada HRT 24 dan 32 hari yaitu variasi MLSS awal yang dilakukan juga memberikan waktu mencapai keadaan tunak yang berbeda-beda.

Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa waktu untuk mencapai keadaan tunak sangat dipengaruhi oleh MLSS awal di dalam bak aerasi.

Dari gambar 2 juga dapat diketahui bahwa di samping MLSS awal, variasi HRT juga menyebabkan perbedaan waktu yang diperlukan untuk mencapai keadaan tunak. Pada MLSS awal 250 mg/l, variasi HRT dari 8,16, 24, dan 32 hari memberikan waktu mencapai keadaan tunak berturut-turut 11,8, 15,8, 19,8, dan 22,7 hari. Pada MLSS awal 500 mg/l, variasi HRT dari 8, 16, 24, dan 32 hari memberikan waktu mencapai keadaan tunak berturut-turut 19,9, 19,7, 22,0, dan 26 hari. Waktu mencapai keadaan tunak pada bagian HRT dan MLSS awal selengkapnya tersaji pada tabel 1.

Tabel 1. Waktu untuk mencapai keadaan tunak pada berbagai HRT dan MLSS awal

MLSS awal, mg/l	COD awal, mg/l	Waktu mencapai keadaan tunak, hari			
		HRT 8 hari	HRT 16 hari	HRT 24 hari	HRT 32 hari
250	300	11,8	15,8	19,8	22,7
500		19,9	19,7	22,0	24,2
1000		22,7	21,6	23,8	26
2000		24,7	23,8	26,1	28,3

Dari tabel 1 dapat diketahui bahwa variasi SRT akan menyebabkan perbedaan waktu yang diperlukan untuk mencapai keadaan tunak. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa di samping MLSS, waktu mencapai keadaan tunak juga sangat dipengaruhi oleh HRT.

Dari tabel 1 juga dapat diketahui bahwa pada HRT 8 hari, waktu untuk mencapai keadaan tunak bervariasi antara 11,8 – 24,7 hari. Hal ini menunjukkan bahwa waktu untuk mencapai keadaan tunak bervariasi antara 1 – 3 kali HRT. Namun demikian berbeda halnya pada HRT 16, 24, dan 32 hari. Pada HRT 16 hari, waktu untuk mencapai keadaan tunak bervariasi antara 1 – 1,5 kali HRT. Pada HRT 24 hari, waktu untuk mencapai keadaan tunak bervariasi antara 0,75 – 1 kali HRT. Pada HRT 32 hari, waktu untuk mencapai keadaan tunak sekitar 0,75 kali HRT. Hal ini dapat digunakan sebagai gambaran bahwa pada HRT rendah, maka waktu yang diperlukan untuk mencapai keadaan tunak berkisar antara 1 – 3 kali HRT. Sedangkan pada HRT tinggi maka waktu yang diperlukan untuk mencapai keadaan tunak sekitar 1 kali HRT. Pada simulasi dan pembahasan di atas masih dilakukan pada COD awal tetap. Simulasi selanjutnya diarahkan untuk mengkaji

pengaruh COD awal terhadap waktu mencapai keadaan tunak.

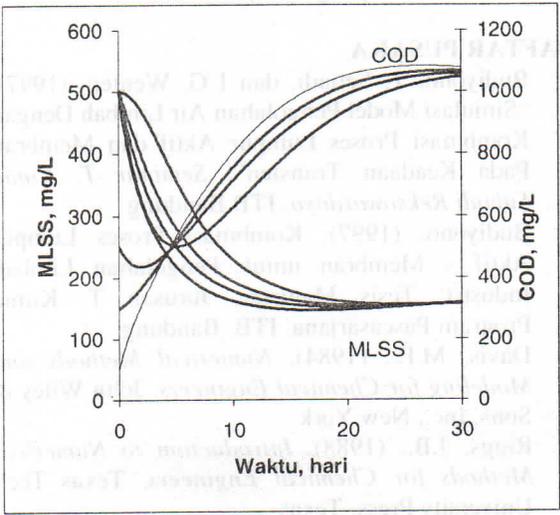
Pengaruh COD terlarut awal terhadap waktu untuk mencapai keadaan tunak

Simulasi pengaruh COD awal terhadap waktu mencapai tunak dilakukan dengan membuat variasi COD awal dari 100, 300, 500, dan 1000 mg/l pada MLSS awal 500 dan 1000 mg/l. Simulasi dilakukan pada HRT 8 dan 24 hari. Hasil simulasi selengkapnya tersaji pada gambar 3.

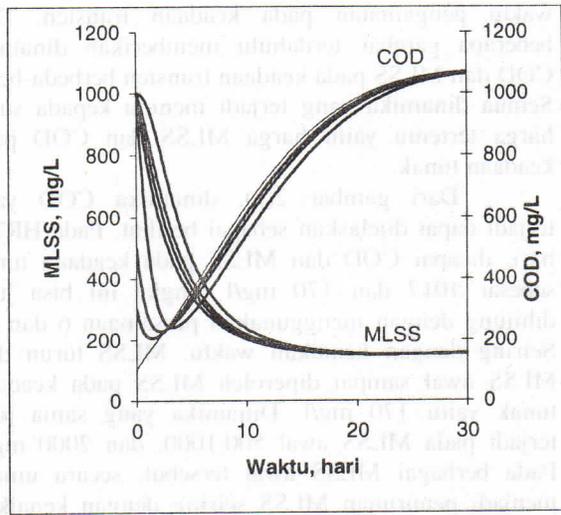
Dari gambar 3(a) dapat diketahui bahwa pada HRT 8 hari dan MLSS awal 500 mg/l, variasi COD awal yang dilakukan tidak memberikan pengaruh terhadap waktu untuk mencapai keadaan tunak. Pada variasi COD awal 100, 300, 500, dan 1000 mg/l memerlukan waktu yang sama untuk mencapai keadaan tunak yaitu 20 hari. Pada HRT 8 hari dan MLSS awal 1000 mg/l (gambar 3.b), variasi COD awal 100, 300, 500, dan 1000 mg/l memerlukan keadaan tunak yang sama yaitu 24 hari. Hal yang sama terjadi pada HRT 24 hari dan MLSS 500 dan 1000 mg/l yaitu variasi COD awal tidak mempengaruhi waktu mencapai keadaan tunak. Kesimpulan akhir yang dapat diambil dari simulasi ini

adalah bahwa waktu mencapai keadaan tunak tidak dipengaruhi oleh COD awal.

Waktu yang diperlukan untuk mencapai keadaan tunak hanya dipengaruhi oleh SRT dan MLSS awal di dalam bak aerasi.

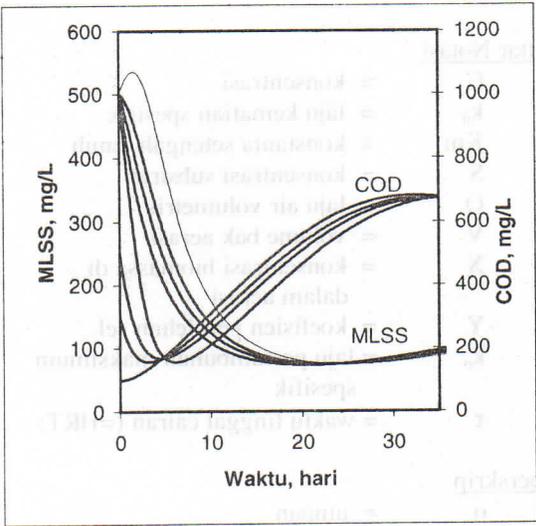


(a). MLSS awal 500 mg/L

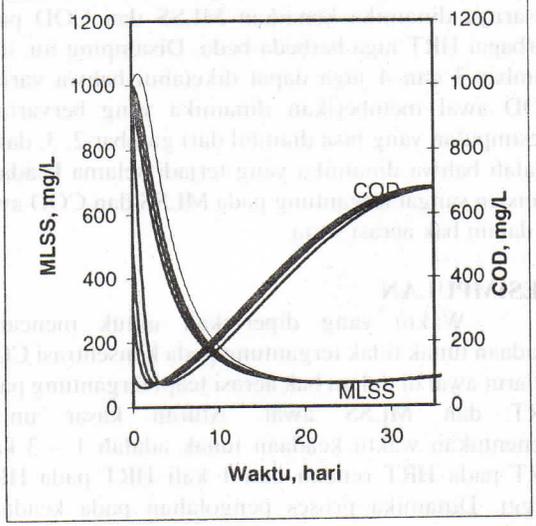


(b). MLSS awal 1000 mg/L

Gambar 3. Pengaruh COD terlarut awal terhadap waktu mencapai keadaan tunak; COD terlarut awal 100, 300, 500, dan 1000 mg/L; HRT 8 hari



(a). MLSS awal 500 mg/L



(b). MLSS awal 1000 mg/L

Gambar 4. Pengaruh COD terlarut awal terhadap waktu mencapai keadaan tunak; COD terlarut awal 100, 300, 500, dan 1000 mg/L; HRT 24 hari

Dinamika COD dan MLSS pada keadaan transien

Dinamika merupakan perubahan (baik naik, turun, maupun tetap) COD dan MLSS sebagai fungsi waktu pengamatan pada keadaan transien. Dari beberapa gambar terdahulu memberikan dinamika COD dan MLSS pada keadaan transien berbeda-beda. Semua dinamika yang terjadi menuju kepada suatu harga tertentu yaitu harga MLSS dan COD pada keadaan tunak.

Dari gambar 2(a), dinamika COD yang terjadi dapat dijelaskan sebagai berikut. Pada HRT 8 hari, dicapai COD dan MLSS pada keadaan tunak sebesar 1017 dan 170 mg/l (angka ini bisa juga dihitung dengan menggunakan persamaan 6 dan 7). Seiring dengan kenaikan waktu, MLSS turun dari MLSS awal sampai diperoleh MLSS pada keadaan tunak yaitu 170 mg/l. Dinamika yang sama juga terjadi pada MLSS awal 500, 1000, dan 2000 mg/l. Pada berbagai MLSS awal tersebut, secara umum menjadi penurunan MLSS seiring dengan kenaikan waktu sampai tercapai keadaan tunak. Pada MLSS awal 250 mg/l, COD sebagai fungsi waktu mengalami peningkatan yang tajam dari 300 mg/l sampai selanjutnya tercapai COD tunak yaitu 1017 mg/l.

Dari gambar 2 juga diketahui bahwa besarnya dinamika kenaikan MLSS dan COD pada berbagai HRT juga berbeda-beda. Disamping itu, dari gambar 3 dan 4 juga dapat diketahui bahwa variasi COD awal memberikan dinamika yang bervariasi. Kesimpulan yang bisa diambil dari gambar 2, 3, dan 4 adalah bahwa dinamika yang terjadi selama keadaan transien sangat tergantung pada MLSS dan COD awal di dalam bak aerasi serta.

KESIMPULAN

Waktu yang diperlukan untuk mencapai keadaan tunak tidak tergantung pada konsentrasi COD terlarut awal di dalam bak aerasi tetapi tergantung pada HRT dan MLSS awal. Aturan kasar untuk menentukan waktu keadaan tunak adalah 1 – 3 kali HRT pada HRT rendah dan 1 kali HRT pada HRT tinggi. Dinamika proses pengolahan pada keadaan transien tergantung pada COD dan MLSS awal di dalam bak aerasi dan HRT. Karena tidak adan patokan yang pasti kapan terjadi keadaan tunak pada tahap pengolahan limbah, maka disarankan, saat pengambilan sampel yang mewakili konsentrasi luaran unit pengolahan limbah dilakukan tidak hanya satu

kali. Sebaiknya pengambilan sampel dilakukan beberapa kali menjelang waktu HRT dicapai sampai selang waktu 3 kali HRT, atau sampai diperoleh konsentrasi luaran yang relatif konstan.

DAFTAR PUSAKA

1. Budiyono, T. Setiadi, dan I G. Wenten, (1997), "Simulasi Model Pengolahan Air Limbah Dengan Kombinasi Proses Lumpur Aktif dan Membran Pada Keadaan Transien", *Seminar T. Kimia Suhadi Reksowardoyo*, ITB Bandung
2. Budiyono, (1997), *Kombinasi Proses Lumpur Aktif – Membran untuk Pengolahan Limbah Industri*, Tesis Magister, Jurusan T. Kimia Program Pascasarjana, ITB, Bandung
3. Davis, M.E., (1984), *Numerical Methods and Modeling for Chemical Engineers*, John Wiley & Sons, Inc., New York
4. Riggs, J.B., (1988), *Introduction to Numerical Methods for Chemical Engineers*, Texas Tech University Press, Texas
5. Scugerl, K., (1985), *Bioreaction engineering*, Volume 1, John Wiley & Sons, Inc., New York
6. Sundstrom, D.W. dan Klei, H.E., (1979), *Wastewater Treatment*, Prentice Hall, Inc., London

Daftar Notasi

C	= konsentrasi
k_d	= laju kematian spesifik
K_m	= konstanta setengah jenuh
S	= konsentrasi substrat
Q	= laju air volumetris
V	= volume bak aerasi
X	= konsentrasi biomassa di dalam aerasi
Y	= koefisien perolehan sel
k_o	= laju pertumbuhan maksimum spesifik
τ	= waktu tinggal cairan (=HRT)

Superskrip

o = umpan

Subskrip

e = luaran

r = resirkulasi