

PEMODELAN DAN SIMULASI PENGOLAHAN LIMBAH FENOL DENGAN MENGGUNAKAN BIOREAKTOR ALIRAN SUMBAT

Misri Gozan

Jurusan Gas dan Petrokimia, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia
Kampus Baru UI Depok 16424

Abstrak

Perkembangan sektor industri yang cukup pesat menimbulkan masalah lingkungan yang cukup serius. Salah satu limbah yang dihasilkan oleh sektor industri adalah limbah fenol. Untuk melindungi kehidupan air dari kerusakan yang parah, maka konsentrasi fenol dalam effluent harus kurang dari 5,8 mg/L [1].

Untuk mengolah limbah fenol dapat dipergunakan proses lumpur teraktifasi dengan jenis bioreaktor yang dipergunakan merupakan jenis reaktor aliran sumbat (*Plug Flow Reactor, PFR*). Desain dari PFR dapat dilakukan dengan merecycle sebagian hasil olahan dalam perbandingan laju alir recycle terhadap laju alir influent (α) tertentu. Parameter lain yang mempengaruhi kinerja reaktor adalah perbandingan antara laju alir recycle terhadap laju alir effluent (β).

Untuk nilai α yang tetap, jika nilai β meningkat, maka nilai $\theta(5,8)$ dan waktu yang diperlukan untuk mencapai kondisi tunak pada proses start-up akan menjadi lebih lama. Jika nilai β semakin besar, maka waktu tinggal limbah dalam reaktor akan semakin cepat dan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kondisi yang tunak pada proses start-up akan semakin cepat pula. Kondisi terbaik pada tulisan ini diperoleh pada saat nilai α dan β berturut-turut adalah 0,8 dan 0,9 dengan $\theta(5,8)$ sebesar 0,08 hari.

Kata kunci : Reaktor aliran sumbat, fenol, mikroorganisme, model

1. PENDAHULUAN

Limbah fenol dikenal sebagai limbah yang beracun dan berbahaya. Fenol sebagai limbah dihasilkan oleh industri pengolahan minyak, batu bara, serta industri farmasi. Fenol juga sering ditemukan pada air buangan industri resin. Fenol adalah alkohol aromatik yang memiliki sebuah gugus -OH yang terikat pada cincin aromatik dan dikenal sebagai limbah bagi air. Fenol juga merupakan *biocide* dan *desinfektan*. Fenol merupakan senyawa beracun yang dapat diabsorb melalui kulit manusia. Efek racun fenol yang cukup akut lebih banyak menyerang kepada sistem syaraf pusat, mengakibatkan gangguan *gastrointestinal*, gagal ginjal, edema paru-paru, dan convulsi [5].

Fenol dapat memberi rasa yang tidak menyenangkan pada air minum jika konsentrasinya di dalam air sangat rendah. Jika limbah fenol terdapat dalam konsentrasi yang cukup tinggi, yaitu di atas 1000 mg/L,

maka sifat racunnya akan dapat menghambat aktifitas biologi dari mikroorganisme [5].

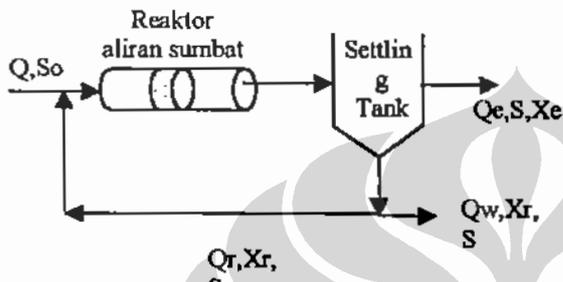
Proses lumpur teraktifasi (*activated sludge*) adalah proses yang umum digunakan untuk mengolah limbah, termasuk limbah fenol. Proses ini dinamakan demikian karena melibatkan produksi massa teraktifasi dari mikroorganisme yang mampu mendegradasi limbah secara aerobik. Reaktor aliran sumbat (*Plug Flow Reactor, PFR*) adalah merupakan reaktor kontinyu dimana fluida bergerak sepanjang reaktor dengan mengabaikan pencampuran pada arah aksial, akan tetapi fluida tercampur sempurna pada arah radial. Massa teraktifasi yang terbentuk diendapkan di dalam tangki pengendapan dan kemudian sebagian dikembalikan ke dalam reaktor dan sebagian lain dibuang.

Kinerja dari reaktor aliran sumbat sangat dipengaruhi oleh beberapa parameter seperti konsentrasi mikroorganisme masuk reaktor, X_0 , perbandingan laju alir recycle terhadap laju alir influent (α), dan perbandingan laju alir recycle terhadap laju alir effluent (β).

Tulisan ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh parameter-parameter tersebut terhadap kinerja reaktor yang diwakili oleh waktu tinggal limbah (*hydraulic retention time*) yang diperlukan untuk mencapai konsentrasi limbah fenol yang aman bagi lingkungan.

2. PEMODELAN [2,3,4]

Diagram alir proses lumpur teraktifasi dapat dilihat pada gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir proses lumpur teraktifasi

Dari gambar 1 terlihat bahwa limbah fenol masuk kedalam sistem pengolahan limbah dengan konsentrasi S_0 dan laju alir Q . Limbah tersebut kemudian dicampur dengan lumpur aktif dari tangki pengendapan. Di dalam reaktor limbah fenol dikonsumsi oleh mikroorganisme sehingga konsentrasinya berkurang dan konsentrasi mikroorganisme bertambah. Limbah yang keluar reaktor diharapkan memiliki konsentrasi sama atau di bawah ambang batasnya. Limbah yang keluar reaktor kemudian memasuki tangki pengendapan untuk menghasilkan *effluent* yang bersih dan lumpur aktif yang akan direcycle ke dalam reaktor dan sebagian lagi diolah lebih lanjut.

Untuk menyelesaikan model tersebut dipergunakan beberapa batasan masalah sebagai berikut :

- Reaktor aliran sumbat bersifat ideal dan isothermal
- Tidak ada reaksi di dalam tangki pengendapan dan di dalam aliran recycle
- Air limbah hanya mengandung limbah fenol

- Persamaan kinetika pertumbuhan mengikuti persamaan Monod

Persamaan Laju

Persamaan laju yang terlibat di dalam reaktor pengolahan limbah meliputi persamaan laju pertumbuhan dan kematian mikroorganisme, serta laju pengurangan substrat.

Di dalam reaktor mikroorganisme mengalami pertumbuhan mengikuti persamaan

$$r_g = \mu_m \frac{S}{K_s + S} \quad (1)$$

Sedangkan laju penurunan jumlah mikroorganisme akibat kematian dan termangsa mengikuti persamaan

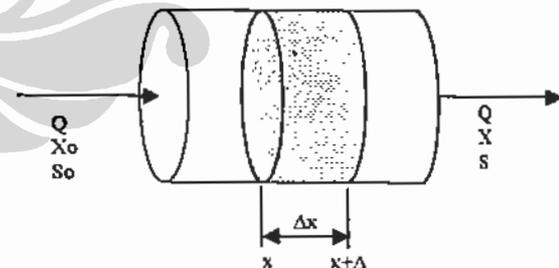
$$r_d = k_d X \quad (2)$$

Laju pengurangan substrat oleh mikroorganisme didefinisikan sebagai

$$r_{su} = - \frac{k S}{(K_s + S)} \quad (3)$$

Model pada Kondisi Tunak

Untuk menyelesaikan model reaktor aliran sumbat dipergunakan neraca massa pada "sumbatan" (*plug*) pada aliran yang dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 2 Reaktor aliran sumbat

Neraca Massa Mikroorganisme

Neraca massa mikroorganisme pada sumbatan adalah:

Akumulasi = input mikroorganisme + laju pertumbuhan mikroorganisme - laju penurunan mikroorganisme - output mikroorganisme

Pada keadaan tunak nilai akumulasi sama dengan nol, maka neraca massa mikroorganisme pada reaktor aliran sumbat dapat ditulis sebagai

$$\frac{Q \cdot d(X)}{dV} = (r_g - r_d) \quad (4)$$

dan jika $Q/dV = 1/d\theta$, maka dengan mensubstitusi persamaan (1) dan (2) akan menjadi

$$\frac{dX}{d\theta} = \left(\mu_m \frac{S}{K_s + S} - k_d \right) X \quad (5)$$

Neraca Massa Substrat

Dengan langkah pengerjaan yang sama, maka akan diperoleh persamaan neraca massa substrat sebagai berikut

$$\frac{dS}{d\theta} = \left(\frac{-k \cdot X \cdot S}{K_s + S} \right) \quad (6)$$

Hubungan Substrat dengan Konsentrasi Mikroorganisme

Dengan menggunakan aturan rantai untuk persamaan differensial dimana

$$\frac{dS}{dX} = \frac{dS}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dX} \quad (7)$$

Jika hasil substitusi persamaan (5) dan (6) diintegrasikan dengan batas bawah $X=X_0$, $S=S_0$, dan batas atas $X=X$, $S=S$, maka akan diperoleh persamaan

$$X = \frac{(\mu_m - k_d)(S_0 - S)}{k} + \frac{k_d K_s}{k} \ln \frac{S}{S_0} + X_0 \quad (8)$$

Hubungan Substrat dengan Waktu Tinggal Rata-Rata (θ)

Untuk mengetahui hubungan substrat dengan waktu tinggal rata-rata, maka dengan mensubstitusi persamaan (8) ke dalam persamaan (6) akan diperoleh

$$d\theta = \frac{-(K_s + S)dS}{S \left[(\mu_m - k_d)(S_0 - S) + \frac{k_d K_s}{k} \ln \frac{S}{S_0} + k \cdot X_0 \right]} \quad (9)$$

Persamaan (9) selanjutnya diintegrasikan secara numeris guna memperoleh hubungan θ dengan S .

Model pada Kondisi Dinamik

Untuk model pada kondisi dinamik, neraca massa pada sumbatan nilai akumulasinya tidak sama dengan nol sehingga neraca massa mikroorganismenya akan menjadi

$$\frac{dX}{d\theta} + \frac{dX}{dt} = \left(\frac{\mu_m \cdot S}{K_s + S} - k_d \right) X \quad (10)$$

Dengan urutan langkah pengerjaan yang sama dengan neraca massa mikroorganisme, dan dengan mensubstitusi persamaan (3) untuk nilai laju penggunaan substrat, r_{su} , akan diperoleh persamaan

$$\frac{dS}{d\theta} + \frac{dS}{dt} = \left(\frac{-k \cdot X \cdot S}{K_s + S} \right) \quad (11)$$

Reaktor Aliran Sumbat dengan Recycle

Pada reaktor aliran sumbat, limbah yang telah diolah di reaktor selanjutnya dimasukkan ke dalam fasilitas tangki pengendapan. Di dalam tangki pengendapan, aliran limbah masuk dengan laju alir, Q_t , dan keluar dengan laju alir *effluent*, Q_e , laju alir recycle, Q_r , dan laju alir buangan (*waste*).

Neraca massa sel mikroorganisme pada tangki pengendapan proses lumpur teraktifasi dengan aliran adalah sebagai berikut :
Input mikroorganisme = output mikroorganisme di *effluent* + output mikroorganisme di *waste*
Atau dapat ditulis

$$Q_t \cdot X = Q_e \cdot X_e + Q_w \cdot X_r + Q_r \cdot X_r \quad (12)$$

Dengan $X_e \approx 0$, $Q/Q_r = 1/\alpha$, dan membagi persamaan (12) dengan Q_r , serta maka akan diperoleh

$$X = \frac{(Q_w / Q_r + 1) X_r}{(1/\alpha + 1)} \quad (13)$$

Jika $Q_w = Q - Q_e$, dan $Q_e/Q_r = 1/\beta$, maka persamaan (13) akan menjadi

$$X = \frac{(\beta - \alpha + \alpha \cdot \beta) X_r}{\beta(1 + \alpha)} \quad (14)$$

Hasil integrasi persamaan (9) dengan batas bawah X_0' dan S_0' akan menghasilkan

$$X = \frac{(\mu_m - k_d)(S_0' - S)}{k} + \frac{k_d \cdot K_s}{k} \ln \frac{S}{S_0'} + X_0' \quad (15)$$

dan

$$X_r = \frac{\left(\frac{(\mu_m - k_d)(S_0' - S)}{k} + \frac{k_d \cdot K_s}{k} \ln \frac{S}{S_0'} \right)}{\left(\frac{\beta - \alpha}{\beta(1 + \alpha)} \right)} \quad (16)$$

Model-model tersebut diselesaikan dengan menggunakan program komputer TURBO PASCAL versi 7.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk menyelesaikan model-model tersebut, maka dipergunakan parameter-parameter mikroorganisme yang umum dipakai untuk proses lumpur teraktifasi untuk adalah sebagai berikut : nilai konstanta kecepatan paruh, K_s , sebesar 60 mg/L, nilai koefisien yield maksimum, Y , sebesar 0,6 mg massa sel/massa substrat terkonsumsi, nilai koefisien laju penurunan, k_d , sebesar 0,06 per hari, nilai laju penggunaan substrat maksimum persatuan massa mikroorganisme, k , sebesar 5 mg substrat terkonsumsi/(mg massa mikroorganisme.waktu) [4]. Nilai tersebut dipakai mengingat terbatasnya data parameter tentang reaktor yang mengolah limbah fenol. Kondisi substrat yang masuk ke dalam reaktor ditentukan sebesar 500 mg/L sesuai dengan rentang konsentrasi fenol yang umum dapat dihadapi oleh bakteri [5]. Limbah diharapkan keluar dari reaktor dengan konsentrasi 5,8 mg/L [1]. Waktu yang diperlukan limbah di dalam reaktor untuk

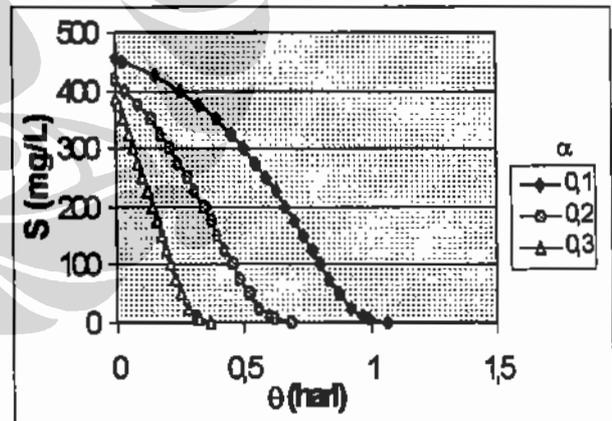
mencapai konsentrasi 5,8 mg/L selanjutnya disebut dengan $\theta(5,8)$.

Pengaruh Rasio Laju Alir Recycle dengan Laju Alir Influent terhadap $\theta(5,8)$ Waktu untuk Mencapai Kondisi Tunak

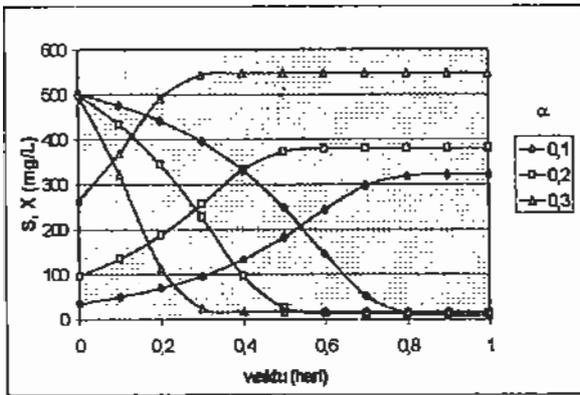
α adalah rasio laju alir recycle terhadap laju alir masuk, Q , dan β adalah rasio laju alir recycle terhadap laju alir *effluent*, Q_e . Pada gambar 3 fenomena yang terjadi adalah semakin cepatnya waktu tinggal limbah dalam reaktor jika nilai α semakin besar. Untuk nilai $\beta = 0,4$, maka pada $\alpha = 0,1$ nilai $\theta(5,8)$ -nya sebesar 1 hari sedangkan pada $\alpha = 0,2$ dan $0,3$ nilai $\theta(5,8)$ -nya berturut-turut adalah 0,63 dan 0,33 hari.

Ada dua kondisi dinamik pada reaktor aliran sumbat dengan recycle. Kondisi dinamik pertama terjadi dimana lumpur aktif yang terbentuk dalam tangki pengendapan belum cukup banyak sehingga tidak ada lumpur aktif yang direcycle. Pada kondisi dinamik pertama harus disuplai mikroorganisme awal yang masuk reaktor, X_0 . Kondisi dinamik kedua terjadi setelah lumpur aktif dari tangki pengendapan mulai dapat direcycle ke dalam reaktor.

Kondisi dinamik pertama untuk reaktor aliran sumbat dengan recycle pada beberapa nilai α untuk β yang tetap dapat dilihat pada gambar 4



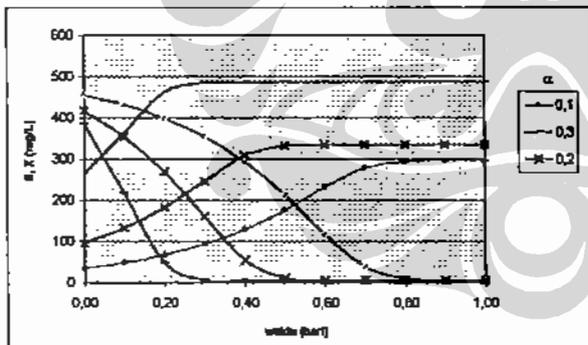
Gambar 3. Pengaruh nilai α terhadap θ pada $\beta = 0,4$



Gambar 4 Kondisi dinamik pertama untuk reaktor aliran sumbat dengan recycle pada beberapa nilai α pada $\beta=0,4$

Dari gambar 4 terlihat bahwa untuk nilai $\alpha=0,1$ maka kondisi tunak yang pertama diperoleh setelah melewati 1,2 hari dengan konsentrasi mikroorganisme 321,8 mg/L. Untuk nilai $\alpha=0,2$ maka kondisi tunak dicapai pada hari ke-0,9 dengan konsentrasi mikroorganisme 379,5 mg/L dan untuk nilai $\alpha=0,3$ maka kondisi tunak dicapai pada hari ke-0,6 dengan konsentrasi mikroorganisme 546,4 mg/L.

Kondisi dinamik kedua untuk reaktor aliran sumbat dengan recycle pada beberapa nilai α untuk β yang tetap dapat dilihat pada gambar 5.



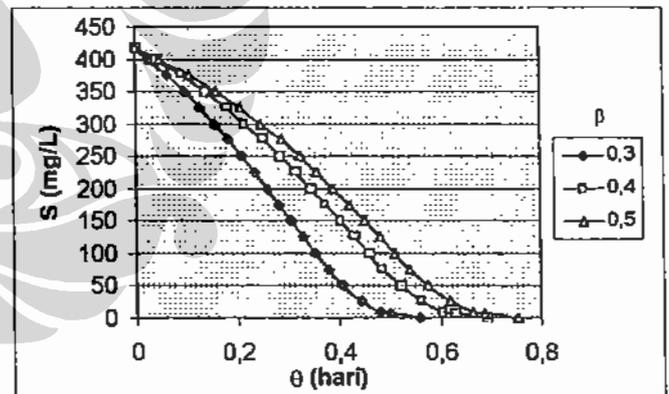
Gambar 5 Kondisi dinamik kedua untuk reaktor aliran sumbat dengan recycle pada beberapa nilai α pada $\beta=0,4$

Dari gambar 5 hasil yang diperoleh adalah untuk kondisi dinamik kedua dengan nilai $\alpha=0,1$ maka kondisi tunak yang pertama diperoleh setelah melewati 1,3 hari

dengan konsentrasi mikroorganisme 295,9 mg/L. Untuk nilai $\alpha=0,2$ maka kondisi tunak dicapai pada hari ke-0,8 dengan konsentrasi mikroorganisme 334,4 mg/L dan untuk nilai $\alpha=0,3$ maka kondisi tunak dicapai pada hari ke-0,6 dengan konsentrasi mikroorganisme 485,2 mg/L.

Nilai β tetap artinya perbandingan antara laju alir recycle terhadap laju alir *effluent* adalah tetap. Jika nilai α mengalami peningkatan sedangkan laju *influent* tetap, maka laju alir recycle-lah yang nilainya semakin besar. Peningkatan laju alir recycle akan diimbangi oleh peningkatan laju alir *effluent*. Dari neraca massa input dan output proses lumpur teraktifasi, peningkatan laju alir *effluent* akan mengakibatkan laju alir lumpur yang dibuang akan semakin sedikit sehingga semakin banyak mikroorganisme yang dikembalikan ke dalam reaktor. Akibatnya semakin banyak mikroorganisme yang dapat mengkonsumsi substrat sehingga laju pengurangan substrat dapat terjadi lebih cepat dan waktu untuk mencapai konsentrasi limbah yang diinginkan akan semakin cepat pula ditambah lagi konsentrasi lumpur yang dihasilkan akan semakin besar.

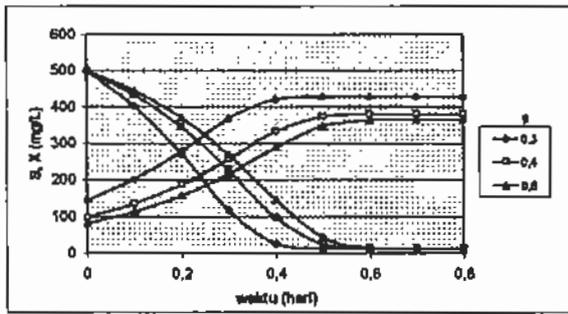
Pengaruh Rasio Laju Alir Recycle dengan Laju Alir *Effluent* terhadap $\theta(5,8)$ Waktu untuk Mencapai Kondisi Tunak



Gambar 6. Pengaruh nilai β terhadap θ pada $\alpha=0,2$

Pada gambar 6, fenomena yang terjadi adalah untuk nilai α yang tetap ($\alpha=0,2$), jika nilai β meningkat, maka nilai $\theta(5,8)$ juga menjadi lebih lama. Untuk $\beta=0,3$ waktu yang dibutuhkan untuk mencapai konsentrasi limbah 5,8 mg/L adalah 0,5

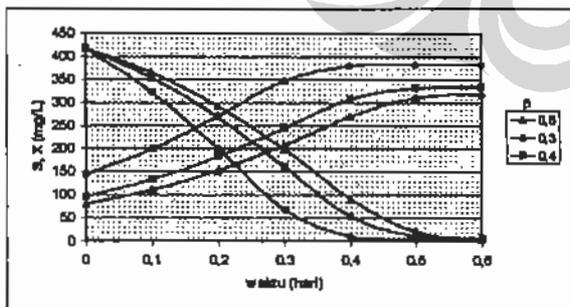
hari, sedangkan untuk nilai $\beta=0,4$ dan $0,5$ nilai $\theta(5,8)$ berturut-turut adalah $0,63$ dan $0,69$.



Gambar 7. Kondisi dinamik pertama reaktor aliran sumbat dengan recycle pada berbagai nilai β pada $\alpha = 0,2$

Dari gambar 7 diperoleh hasil untuk $\beta = 0,3$, kondisi tunak diperoleh pada hari ke-0,8 dengan konsentrasi mikroorganisme sebesar $428,2 \text{ mg/L}$. Untuk nilai $\beta = 0,4$ maka kondisi tunak dicapai pada hari ke-0,9 dengan konsentrasi mikroorganisme $379,5 \text{ mg/L}$. Untuk nilai $\beta = 0,5$ kondisi tunak dicapai setelah hari ke-1 dengan konsentrasi mikroorganisme sebesar $365,5 \text{ mg/L}$.

Dari gambar 8 diperoleh hasil untuk $\beta = 0,3$, kondisi tunak diperoleh pada hari ke-0,7 dengan konsentrasi mikroorganisme sebesar $382,5 \text{ mg/L}$. Untuk nilai $\beta = 0,4$ maka kondisi tunak dicapai pada hari ke-0,8 dengan konsentrasi mikroorganisme $334,44 \text{ mg/L}$. Untuk nilai $\beta = 0,5$ kondisi tunak dicapai setelah hari ke-0,8 dengan konsentrasi mikroorganisme sebesar $319,04 \text{ mg/L}$.



Gambar 8. Kondisi dinamik kedua reaktor aliran sumbat dengan recycle pada berbagai nilai β pada $\alpha = 0,2$

Jika nilai α tetap sementara laju alir *influent* tetap, maka laju alir recycle juga akan tetap. Jika nilai β meningkat, maka laju alir *effluent*-lah yang menjadi semakin kecil. Berdasarkan neraca massa input-output sistem, maka laju alir buangan semakin besar. Laju alir buangan yang semakin besar menandakan semakin sedikitnya laju alir mikroorganisme yang dikembalikan ke dalam reaktor. Kondisi tersebut mengakibatkan semakin sedikitnya mikroorganisme awal yang dapat mengkonsumsi substrat akibatnya laju pengurangan substrat semakin lambat dan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai konsentrasi yang diinginkan menjadi semakin lambat pula dan jumlah mikroorganisme yang dihasilkan di akhir reaktor tidak sebanyak mikroorganisme yang terbentuk pada β yang lebih kecil.

4. KESIMPULAN

Hasil simulasi menunjukkan bahwa kinerja reaktor aliran sumbat dipengaruhi oleh jumlah lumpur aktif yang direcycle. Semakin besar lumpur aktif yang direcycle, ditandai oleh semakin besarnya nilai α dan semakin kecilnya nilai β , maka akan semakin cepat waktu tinggal limbah di dalam reaktor untuk menghasilkan konsentrasi yang sama dan akan semakin cepat pula waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kondisi tunaknya.

DAFTAR NOTASI

- A luas penampang tangki pengendapan (m^2)
- D diameter partikel (cm)
- k laju penggunaan substrat maksimum per unit massa mikroorganisme (waktu^{-1})
- k_d koefisien peluruhan atau konstanta reaspirasi endogen (waktu^{-1})
- K_s konstanta kecepatan paruh, konsentrasi substrat pada $\frac{1}{2}$ laju pertumbuhan maksimum atau konstanta kejenuhan substrat (massa/unit volume)
- r_B laju pertumbuhan bakteri (massa/unit volume.waktu)
- r_B' laju pertumbuhan bakteri terkoreksi (massa/unit volume.waktu)
- r_d laju peluruhan (massa/satuan volume.waktu)
- r_{su} laju penggunaan substrat (massa/satuan volume.waktu)

- S konsentrasi substrat pembatas pertumbuhan (massa/satuan volume.waktu)
- X konsentrasi mikroorganisme (massa/unit volume)
- Y koefisien yield maksimum (mg/mg) (didefinisikan sebagai rasio massa sel yang terbentuk terhadap massa substrat yang dikonsumsi, diukur selama periode tertentu pada fasa log).

Research Event, Noosa lake, Queensland-Australia, 1997.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kepada Sigit Sri Wibisono, TGP Ang. 94 yang telah membantu pemrograman pada Pascal.

Simbol Yunani

- α perbandingan antara laju alir recycle terhadap laju alir *influent*
- β perbandingan antara laju alir recycle terhadap laju alir *effluent*
- θ waktu tinggal rata-rata di dalam reaktor, unit waktu
- μ laju pertumbuhan spesifik, waktu⁻¹
- μ_m laju pertumbuhan spesifik maksimum, waktu⁻¹

Subscript

- c aliran *effluent*
- w aliran buangan (*waste*)
- r aliran recycle

Superscript

- c kondisi masuk reaktor pada PFR dengan recycle

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Amornprasertsook, K., Polprasert, C., "Toxicity and Removal of Phenol by a Land treatment System", *Env. Tech.*, 17 (1996) 783-788.
- [2] Blanch, Harvey W., Clark, Douglas S., , *Biochemical Engineering*, Marcel Dekker, Inc., New York,1997.
- [3] Fogler, H., Scott, *Elements of Chemical Reaction Engineering*, 2nd ed., Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 1992.
- [4] Metcalf & Eddy, *Wastewater Engineering Treatment Disposal Reuse*, McGraw-Hill Inc., Singapore, 1991.
- [5] Yoong, E.T., Lant P.A., "Removal Of High Fenol Accord To Bioreactor Types", *Environmental Engineering*