

PENENTUAN KOEFISIEN *YIELD* (Y) DAN KOEFISIEN *ENDOGENOUS DECAY* (k_d) PADA PROSES LUMPUR AKTIF TERHADAP AIR TERPRODUKSI DENGAN REAKTOR *BATCH*

YIELD COEFFICIENT (Y) AND ENDOGENOUS DECAY COEFFICIENT (k_d) DETERMINATION IN ACTIVATED SLUDGE PROCESS OF PRODUCED WATER IN BATCH REACTOR

Ipung Fitri Purwanti dan Rita Mustika Wahyuning Srie Gunarti
Jurusan Teknik Lingkungan FTSP-ITS, Surabaya
email: purwanti@enviro.its.ac.id
sg_rita@yahoo.com

Abstrak

Air terproduksi merupakan produk buangan kegiatan pengeboran minyak bumi dan gas yang mengandung salinitas tinggi, organik terlarut, organik tak terlarut dan logam berat. Proses lumpur aktif yang memanfaatkan peran mikroorganisme aktif dapat diaplikasikan dalam pengolahan Air terproduksi. Salah satu kriteria yang dibutuhkan dalam perencanaan bangunan lumpur aktif adalah koefisien biokinetik, yaitu koefisien yield (Y) dan koefisien endogenous decay (k_d). Keduanya digunakan dalam mendesain dimensi reaktor, perkiraan jumlah produksi lumpur dan kebutuhan oksigen dalam proses lumpur aktif. Penentuan Y dan k_d dari kultur campuran teraklimatisasi terhadap limbah air terproduksi asli yang berasal dari wilayah pengeboran migas di daerah Poleng, Laut Jawa dilakukan secara aerobik batch selama 24 jam. Sebelumnya, ditentukan komposisi nutrisi ($BOD_5 : N : P$) terbaik dari air limbah dengan aerasi selama 96 jam dilihat dari efisiensi penyisihan COD, TSS dan minyak terbesar di antara variasi yang digunakan.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa komposisi nutrisi ($BOD_5 : N : P$) terbaik untuk efisiensi penyisihan COD, TSS dan minyak adalah 100 : 10 : 1 dengan nilai berturut-turut sebesar 70,59%, 63% dan 81,41%. Nilai Y dan k_d dari kultur campuran terhadap limbah air terproduksi dengan penambahan nutrisi adalah sebesar 0,3806 mg VSS/mg COD dan 0,0602 hari⁻¹. Tanpa penambahan nutrisi dihasilkan nilai Y dan k_d sebesar 0,3684 mg VSS/mg COD dan 0,0736 hari⁻¹.

Kata kunci: air terproduksi, lumpur aktif, koefisien yield, koefisien endogenous decay

Abstract

Produced water is a waste material in drilling activity of oil and gas industry, containing high salinity, dissolved organics, suspended organics and heavy metals. The application of biotechnology using activated sludge was begun with planning and designing the wastewater treatment installation. Activated sludge coefficients, the yield coefficient (Y) and the endogenous decay (k_d) were needed in the reactor dimension design, sludge production estimation and oxygen required. Determination of the acclimated mixed-culture's Y and k_d toward produced water, taken from oil and gas drilling area in Poleng, Java Sea, was set aerobically in batch reactor for 24 hours. The best nutrient composition ($BOD_5 : N : P$) was determined for 96 hours aeration time, considering the highest efficiency removal of COD, TSS and oil and grease among variations given.

The results showed that the best nutrient composition in removing COD, TSS and oil and grease was 100 : 10 : 1, with removal efficiency up to 70,59%, 63% and 81,41%. Y and k_d of mixed-culture toward produced water with additional nutrient were 0,3806 mg VSS/mg COD and 0,0602 day⁻¹. Whereas, non-additional nutrient showed a result of Y and k_d : 0,3684 mg VSS/mg COD and 0,0736.day⁻¹.

Keyword: produced water, activated sludge, yield coefficient, endogenous decay coefficient.

1. PENDAHULUAN

Pada pengeboran sumur minyak dari industri eksplorasi dan produksi minyak dan gas bumi, dihasilkan lumpur campuran minyak mentah-gas

bumi-air. Campuran tersebut dipisahkan dengan *gas-oil separator plant (GOSP)* menjadi gas yang dimampatkan atau *Liquefied Natural Gas (LNG)*. Minyak mentah yang dikumpulkan di stasiun pengumpul (SP) yang kemudian dikirim ke pabrik

refinery untuk dipisahkan menjadi beberapa fraksi dengan cara destilasi, dan air terproduksi sebagai limbah cair yang harus diolah.

Air terproduksi dihasilkan dalam jumlah cukup besar yang umumnya mengandung salinitas tinggi, minyak tersuspensi, organik terlarut dan logam berat. Johnsen *et al.* (1975; dalam Wilujeng, 2001) membagi sumber toksisitas air terproduksi dalam enam kelompok, yaitu: salinitas tinggi, kandungan logam berat, organik terlarut, bahan organik tak terlarut, bahan kimia yang ditambahkan pada proses pengolahan minyak, dan kekuatan radioaktifitas. Abdel-Aal, Aggoer dan Fahim (2003) menyatakan bahwa air terproduksi mengandung substansi terlarut seperti fenol, hidrokarbon aromatik, logam berat dan senyawa lainnya yang kadarnya melebihi baku mutu yang berlaku.

Proses *recovery* limbah yang mengandung minyak meliputi proses fisik, mekanik dan biologis. Fraksi yang mudah terpisah dari air dipisahkan dengan proses fisik dan mekanik, sedangkan untuk fraksi yang teremulsi atau terlarut digunakan proses biologis. Teknologi pengolahan biologis yang digunakan adalah proses lumpur aktif Mikroba yang digunakan diisolasi dari tanah yang terkontaminasi minyak di lingkungan sekitar daerah tambang.

Bakteri pengurai hidrokarbon tersebar luas di laut, sungai, dan tanah. Terdapat lebih dari 100 spesies mikroba yang menggunakan hidrokarbon sebagai substrat, untuk sumber energi dalam pembentukan sel (Atlas, 1992; dalam Wilujeng, 2001). Jenis bakteri pengurai hidrokarbon dalam lingkungan air antara lain: *Pseudomonas*, *Achromobacter*, *Arthrobacter*, *Micrococcus*, *Vibrio*, *Nocordia*, *Acinetobacter*, *Brevibacterium*, *Corynebacterium*, dan *Flavobacterium*. *Nocordia* mampu mengurai hidrokarbon aromatis (Cookson, 1995 dalam Wilujeng, 2001). Jenis bakteri yang banyak ditemukan dan mampu mengoksidasi hidrokarbon adalah spesies dari *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Micrococcus*, *Rhodo-coccus*, dan *Arthrobacter*

Dalam penentuan parameter-parameter proses dan desain proses lumpur aktif digunakan pendekatan kinetika kimia dan persamaan Monod. Persamaan Monod digunakan untuk mengetahui nilai koefisien *yield* (Y) dan koefisien *endogenous decay* (k_d). Nilai Y menunjukkan jumlah biomassa yang dihasilkan per substrat yang disisihkan (mg

MLVSS/mg COD). Nilai k_d menunjukkan jumlah biomassa yang hilang selama respirasi *endogenous*. Koefisien ini tergantung dari jenis mikroba, karakteristik air limbah dan kondisi pendukung lainnya (Brock, 1994). Koefisien ini digunakan dalam mendesain dimensi reaktor, jumlah produksi lumpur maupun kebutuhan oksigen.

Penentuan Y dan k_d lebih mudah ditentukan melalui percobaan *batch*. Reaktor *batch* merupakan suatu sistem tertutup dengan kandungan substrat awal yang terbatas. Jika dalam reaktor ditambahkan mikroba, maka akan terjadi pertumbuhan mikroorganisme. Selama proses berlangsung, tidak terjadi aliran masuk maupun keluar. Penentuan koefisien Y dan k_d dilakukan dengan beberapa reaktor *batch* skala laboratorium yang diinokulasi lumpur aktif. Pengujian dilakukan dengan aerasi 24 jam, agar didapat nilai Y dan k_d yang lebih akurat dibanding aerasi dengan waktu lebih singkat. Penentuan model persamaan didasarkan pada hubungan konsumsi substrat dan produksi sel mikroba:

Pertumbuhan netto = total pertumbuhan + kehilangan biomassa untuk respirasi endogenous

Laju pertumbuhan netto sel, dapat dituliskan:

$$\left[\frac{dX}{dt} \right] = \left[\frac{dX}{dt} \right]_{total} + \left[\frac{dX}{dt} \right]_{endogenous}$$

atau dapat juga dituliskan sebagai berikut:

$$\frac{dX}{Xdt} = Y \frac{dS}{Xdt} - k_d$$

$$\frac{\Delta X}{X\Delta t} = Y \frac{\Delta S}{X\Delta t} - k_d$$

dengan:

dX/dt = laju produksi sel biomassa (mg/L. hari)

dS/dt = laju bio-oksidasi substrat (mg/L.hari)

Y = koefisien hasil (mg VSS/mg COD)

k_d = fraksi MLSS teroksidasi oleh respirasi *endogenous* per satuan waktu (1/hari)

atau:

$$\frac{1}{X} \frac{\Delta X}{\Delta t} = \frac{Y}{X} \frac{\Delta S}{\Delta t} - k_d$$

Jika percobaan dilakukan dalam waktu satu hari, maka:

$$\frac{\Delta X}{X} = Y \frac{\Delta S}{X} - k_d$$

dengan :

ΔX = perubahan konsentrasi sel, (mg/L)

ΔS = perubahan konsentrasi substrat, (mg/L)

$$\begin{aligned} \Delta t &= \text{waktu pengukuran} \\ \bar{X} &= \text{rata-rata konsentrasi sel biomassa,} \\ &\quad (\text{mg/L}) \\ &= (X_o + X_t)/2 \end{aligned}$$

Persamaan 5 merupakan bentuk persamaan garis lurus $y=mx+b$. Jika diperoleh data percobaan dari beberapa bioreaktor *batch*, maka dengan plotting $\Delta X/X_{\text{rerata}}$ sebagai ordinat dan $\Delta S/X_{\text{rerata}}$ sebagai absis, akan diperoleh garis lurus. Nilai Y merupakan *slope* atau sudut arah garis dengan k_d sebagai intersepnya (Slamet dan Masduqi, 2000).

Penelitian ini dimaksudkan untuk mengetahui penambahan nutrisi terbaik terhadap efisiensi penyisihan COD, TSS dan minyak. Tujuan lainnya adalah untuk mendapatkan nilai koefisien biokinetik proses lumpur aktif yaitu koefisien *yield* (Y) dan koefisien *endogenous decay* (k_d) kultur campuran terhadap air terproduksi dengan dan tanpa penambahan nutrisi secara *batch*.

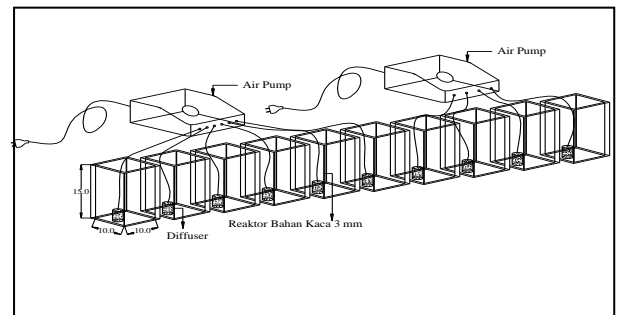
2. METODE PENELITIAN

Air terproduksi yang digunakan berasal dari pengeboran minyak dan gas di wilayah Poleng, Madura, Laut Jawa. Mikroba yang digunakan adalah kultur campuran yang dibiakkan oleh Pusat Penelitian Antar Universitas ITB. Langkah-langkah dalam penelitian ini adalah:

1. Analisis awal karakteristik air terproduksi, dimaksudkan untuk mengetahui karakteristik limbah air terproduksi, dan mencakup analisis BOD₅, COD, minyak, TSS, N, P dan pH.
2. Pengayaan kultur campuran, dimaksudkan untuk mengaktifkan mikroba pada media kaya nutrisi. Komposisi media yaitu: glukosa (1,25 gram/L), KH₂PO₄ (0,5 gram/L), (NH₄)₂SO₄ (0,75 gram/L) dan FeCl₃ (0,05 gram/L), kemudian digoyang pada *orbital shaker* pada 150 rpm selama \pm 24 jam.
3. Penelitian pendahuluan penentuan komposisi nutrisi (BOD₅:N:P), dilakukan untuk memilih komposisi N dan P selama 96 jam terhadap efisiensi penyisihan COD, TSS dan minyak. Variasi komposisi BOD₅:N:P yang digunakan yaitu 100:1:1, 100:5:1 dan 100:10:1. Komposisi nutrisi dengan efisiensi penyisihan paling baik akan digunakan untuk penentuan Y dan k_d .
4. Pembenihan dan aklimatisasi, dilakukan untuk memperoleh jumlah biomassa pengurai limbah yang diinginkan. Media menggunakan glukosa sebagai sumber C, dengan tujuan agar mikroba lebih cepat berkembang biak. Pada tahap ini

dilakukan perubahan substrat dari media sintesis menjadi air terproduksi. Proses dihentikan bila dengan pembebanan air limbah 100% telah dicapai kondisi stabil yang ditandai dengan penyimpangan kurang dari 10% dari pengukuran nilai PV sebanyak tiga kali berturut-turut dalam selang waktu 12 jam (kondisi *steady state*).

5. Penentuan koefisien *yield* (Y) dan koefisien *endogenous decay*, dilakukan dengan penambahan nutrisi dan tanpa nutrisi. Penentuan Y dan k_d dengan nutrisi dilakukan sesuai dengan komposisi nutrisi terbaik terhadap efisiensi penyisihan yang dilakukan pada penelitian pendahuluan. Penentuan Y dan k_d dilakukan secara *batch* dengan 10 reaktor aerobik berukuran 1 L (Gambar 1). Variasi yang dilakukan adalah 10 variasi F/M, yaitu \pm 0,2; 0,25; 0,3; 0,4; 0,6; 0,8; 1; 1,2; 1,4 dan 1,6 lb BOD₅/lb MLVSS.hari. Variasi rasio F/M dilakukan dengan variasi MLVSS awal untuk mereduksi substrat dengan jumlah dan konsentrasi yang sama selama 24 jam. Tahapan penentuan koefisien *yield* (Y) dan koefisien *endogenous decay* (k_d) dapat dilihat pada Gambar 2.



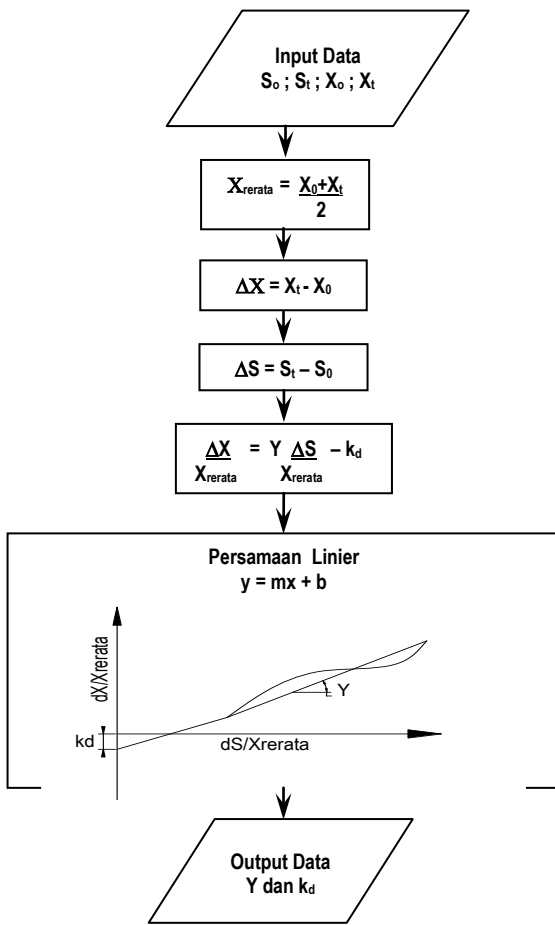
Gambar 1. Reaktor *batch* untuk penentuan koefisien *yield* (Y) dan koefisien *endogenous decay* (k_d)

6. Analisis parameter. Parameter-parameter yang dianalisis meliputi BOD₅, COD, PV, TSS, MLVSS dan minyak sebagai parameter utama, serta DO dan pH sebagai parameter kontrol.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik air terproduksi tercantum pada Tabel 1. Nilai BOD₅, N dan P jika dikonversikan ke bentuk perbandingan komposisi maka besarnya adalah 100:0,78:0,08.

Pengaruh Komposisi Nutrien (BOD₅:N:P) terhadap Penyisihan COD, TSS dan Minyak
Pengaruh komposisi nutrisi (BOD₅:N:P) terhadap penyisihan COD, TSS dan minyak dapat dilihat pada Gambar 3, Gambar 4, dan Gambar 5.



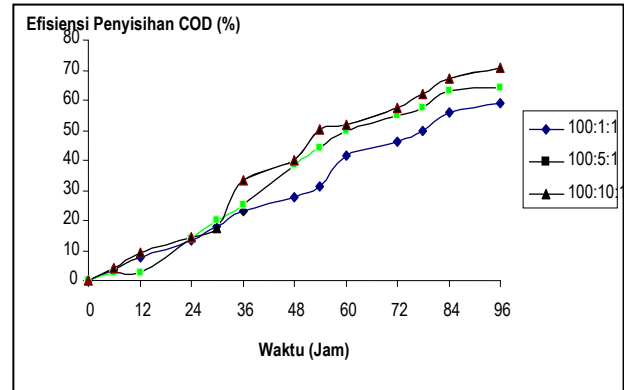
Gambar 2. Tahapan penentuan koefisien yield (Y) dan koefisien endogenous decay (kd)

Tabel 1. Karakteristik awal air terproduksi

No.	Parameter	Nilai	Baku Mutu*)	Satuan
1	BOD ₅	720	100	mg/L
2	COD	1600	200	mg/L
3	TSS	276	100	mg/L
5	Minyak	640	25	mg/L
6	pH	8,16	6-9	mg/L
7	N	5,6		mg/L
8	P	0,6		mg/L

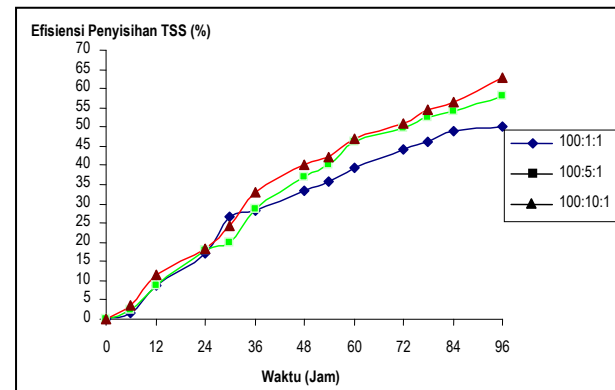
*) Kep. Men. LH: Kep-09/MENLH/1997 tentang Baku Mutu Limbah Cair (BMLC) bagi Kegiatan Minyak dan Gas serta Panas Bumi

Berdasarkan Gambar 3, dapat dilihat bahwa penyisihan bahan organik yang terkandung dalam air limbah terjadi dengan lambat. Hal ini dikarenakan kultur campuran belum teraklimatisasi sehingga kultur campuran masih beradaptasi dengan substrat yang diolah dan dampaknya adalah penyisihan bahan organik terjadi secara perlahan. Penyisihan terbesar adalah pada pemberian nutrisi dengan komposisi nutrisi 100:10:1. Fenomena penyisihan COD ini berhubungan erat dengan pertumbuhan biomassa yang terjadi.

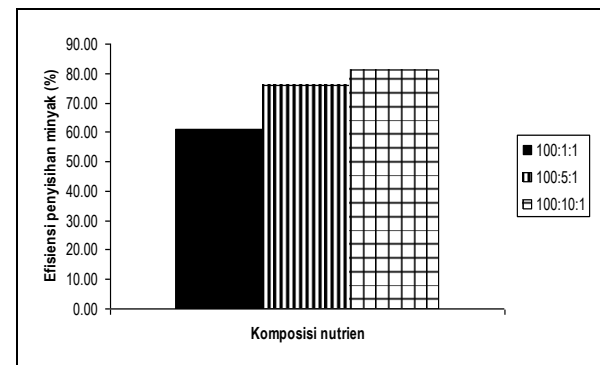


Gambar 3. Efisiensi Penyisihan COD

Berdasarkan kurva yang ditunjukkan pada Gambar 4, penurunan TSS terjadi secara perlahan, namun prosentasenya terus naik selama 96 jam. Hal ini menunjukkan bahwa tingkat kematian sel masih relatif lebih kecil dibandingkan dengan jumlah produksi sel. Hal yang mendasari pemikiran ini adalah bahwa jika mikroorganisme mati, jasadnya (*cell debris*) akan teranalisis sebagai TSS dan nilainya adalah 10-15 persen dari berat sebenarnya (Metcalf dan Eddy, 2003). Efisiensi penyisihan TSS terbesar adalah pada pemberian komposisi nutrisi sebesar 100:10:1 dengan prosentase sebesar 63%.



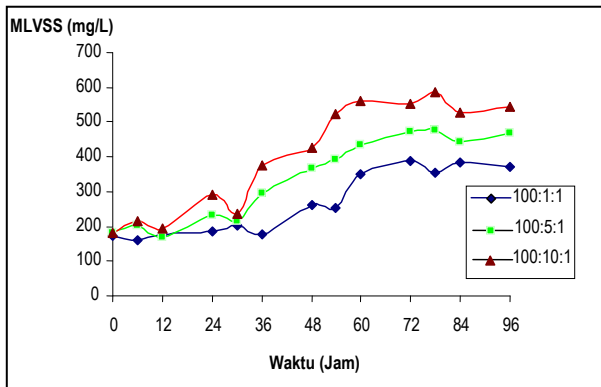
Gambar 4. Efisiensi Penyisihan TSS



Gambar 5. Efisiensi Penyisihan Minyak

Pada Gambar 5, Efisiensi penyisihan minyak terbesar terjadi pada komposisi nutrisi sebesar 100:10:1. Kecenderungan penyisihan minyak sama dengan penyisihan COD karena di dalam analisis COD, zat-zat yang dapat dioksidasi oleh dikromat salah satunya adalah minyak dan hidrokarbon aromatik.

Berdasarkan Gambar 6, Fase awal atau lag dimana pertumbuhan sel tidak terlalu menonjol terjadi hingga jam ke-30 untuk variasi nutrisi 100:5:1 dan 100:10:1. Sementara untuk variasi nutrisi 100:1:1, fase lag yang terjadi lebih lama yaitu hingga jam ke-36. Hal ini karena pada variasi nutrisi 100:1:1, metabolisme sel tidak terjadi secara optimal karena adanya faktor pembatas yaitu nutrisi N dan P.



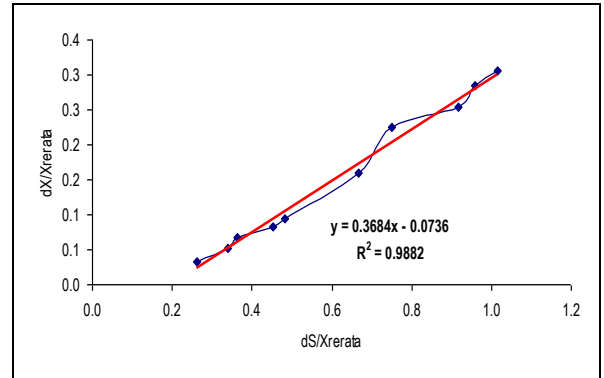
Gambar 6. Pertumbuhan Mikroorganisme

Penentuan Koefisien Yield (Y) dan Koefisien Endogenous Decay (k_d)

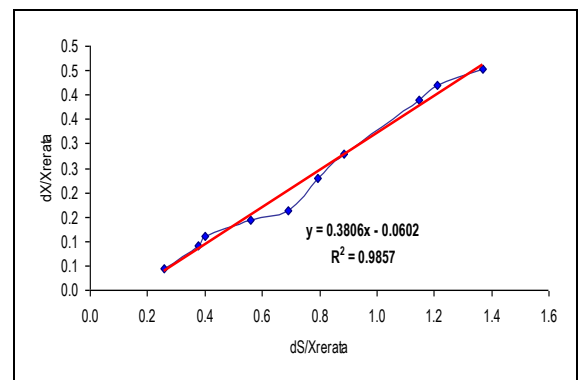
Penentuan koefisien biokinetik yaitu koefisien yield (Y) dan koefisien endogenous decay (k_d) menggunakan 10 buah variasi F/M dengan memvariasikan nilai MLVSS untuk konsentrasi substrat yang sama. Hasil akhirnya berupa kurva linier dengan 10 titik laju biooksidasi substrat terhadap laju produksi sel biomassa. Dari kurva tersebut dapat diketahui nilai k_d dan Y.

Hasil penelitian penentuan koefisien yield (Y) dan koefisien endogenous decay (k_d) dari suatu kultur campuran terhadap limbah air terproduksi tanpa penambahan nutrisi dapat dilihat pada Gambar 7. Sementara, dengan penambahan nutrisi dapat dilihat pada Gambar 8.

Dengan demikian, koefisien yield (Y) dan koefisien endogenous decay (k_d) tanpa dan dengan penambahan nutrisi (N dan P) dapat dilihat pada Tabel 2.



Gambar 7. Kurva penentuan koefisien yield (Y) dan koefisien endogenous decay (k_d) tanpa penambahan nutrisi



Gambar 8. Kurva penentuan koefisien yield (Y) dan koefisien endogenous decay (k_d) dengan penambahan nutrisi.

Salah satu penyebab besarnya jumlah sel-sel biomassa yang mengalami respirasi endogenous adalah terbatasnya ketersediaan substrat untuk pertumbuhan. Rumus molekuler yang menggambarkan komposisi biomassa adalah C₆₀H₈₇O₂₃N₁₂P, sehingga untuk mensintesis sel biomassa diperlukan paling tidak unsur-unsur karbon, oksigen, hidrogen, nitrogen dan fosfor.

Tabel 2. Koefisien yield (Y) dan Endogenous Decay (k_d) Pada Proses Lumpur Aktif Terhadap Limbah Air Terproduksi Dengan Dan Tanpa Penambahan Nutrien

	Koefisien Biokinetik	
	Y (mg VSS/mg COD)	k _d (hari ⁻¹)
Tanpa Penambahan Nutrien (N dan P)	0,3684	0,0736
Dengan Penambahan Nutrien (N dan P)	0,3806	0,0602

Berlaku untuk:
Substrat = Air terproduksi di pengeboran sumur minyak wilayah Poleng, Madura, Laut Jawa, dengan COD = 1600 mg/L, pH = 6-8, DO > 2 mg/L

Pembatas bagi pertumbuhan mikroba dalam penentuan Y dan k_d tanpa penambahan nutrisi adalah unsur N dan P.

4. KESIMPULAN

Dalam kasus limbah air terproduksi yang diambil dari wilayah pengeboran daerah Poleng, laut Jawa, komposisi BOD₅:N:P yang memberikan efisiensi penyisihan COD, TSS dan minyak terbaik dari variasi yang digunakan adalah 100:10:1 dengan nilai berturut-turut: 70,59%, 63% dan 81,41% (selama 96 jam). Koefisien *yield* (Y) dan koefisien *endogenous decay* (k_d) dari kultur campuran terhadap air terproduksi tanpa penambahan nutrisi adalah sebesar 0,3684 mg VSS/mg COD dan 0,0736.hari⁻¹. Koefisien *yield* (Y) dan koefisien *endogenous decay* (k_d) dari kultur campuran terhadap air terproduksi dengan penambahan nutrisi adalah sebesar 0,3806 mg VSS/mg COD dan 0,0602 hari⁻¹.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdel-Aal, H.K., Aggoer, M., and Fahim, M.A. (2003). **Petroleum and Gas Field Processing**. New York: Marcel Dekker, Inc.
- Anonymus. (1998). **Standard Methods for The Examination of Water and Waste Water**. 20nd edition. USA: American Public Health Association.
- Brock, M.T.D. (1994). **Biology of Microorganism**. USA: Prentice-Hall, Inc.
- Hughes S. W., Sehsuvaroglu S. A and Slater J. M. (1994). **Produced Water Treatment Technologies : A Case Study**, Paper SPE 27131 dipresentasikan pada *The International Conference on Health, Safety and Environment in Oil and Gas Production di Jakarta, Indonesia, 25-27 Januari 1994*.
- Lansing, M.P., Harley, J.P. dan Klein, D.A. (2002). **Microbiology**. Fifth edition. New York: Mc Graw-Hill Co., Inc.
- Leahy, J. G dan R. R Colwell (1990). **Microbial Degradation of Hydrocarbon in The Environments**. *Microbiological Reviews*. **54(3)**. 305-315.
- Marsid, M. dan Suwito S. (1994). **Produced Water Treatment**. Paper SPE 27177 dipresentasikan pada *The International Conference on Health, Safety and Environment in Oil and Gas Production di Jakarta, Indonesia, 25-27 Januari 1994*.
- Metcalf dan Eddy (1991). **Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse**. Third edition. Singapore: Mc Graw-Hill Co., Inc.
- Metcalf dan Eddy (2003). **Wastewater Engineering: Treatment and Reuse**. Fourth edition. Singapore: Mc Graw-Hill Co., Inc.
- Pelczar, M.J., dan Chan, E.C.S. (1986). **Dasar-Dasar Mikrobiologi**. Jilid 1.: Universitas Indonesia-Press, Jakarta.
- Reliantoro, S. (1992). **Penentuan Koefisien Yield dan Koefisien Endogenous pada Proses Lumpur Aktif dengan Menggunakan Sampel Air Limbah Pabrik Kertas pada Reaktor Pilot Plant**. Skripsi. Jurusan Teknik Lingkungan, FTSP-ITS.
- Reynolds, Tom D. (1996). **Unit Operations and Processes in Environmental Engineering**. Second Edition. Boston: PWS Publishing Company.
- Slamet, A. dan Masduqi, A. (2000). **Satuan Proses**, Modul Ajar, Jurusan Teknik Lingkungan, FTSP-ITS, Surabaya
- Wilujeng, S. A. (2001). **Pengolahan Air Terproduksi Industri Minyak Bumi dengan Proses Kontak Stabilisasi**. Tesis. Bandung: Teknik Lingkungan, FTSP-ITB.