

KINETIKA DEGRADASI MINYAK BUMI OLEH MIKROORGANISME PADA BERBAGAI SALINITAS DAN BIODEGRADASI MINYAK BUMI PADA SKALA PILOT STUDI KASUS BIODEGRADASI MINYAK BUMI SKALA LABORATORIUM

THE KINETICS OF PETROLEUM DEGRADATION BY MICROORGANISMS IN SEVERAL SALINITY AND BIODEGRADATION OF PETROLEUM IN PILOT SCALE CASE STUDY OF PETROLEUM DEGRADATION IN LABORATORIUM SCALE

Astri Nugroho, Edison Effendi, dan Fiona Annisa

Prodran Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Arsitektur Lansekap dan Teknologi Lingkungan

Universitas Trisakti, Jl. Kyai Tapa No.1, Grogol, Jakarta

astri@fun-dering.com, fiona_annisa@yahoo.com

Abstrak : Parameter kinetika biodegradasi yang dihitung yaitu μ , μ_m , Y , Y_t , Y_{obs} , K_d , K_s , dari penentuan konsentrasi TPH (Total Petroleum Hidrocarbon) dan VSS (Volatile Suspended Solid) pada setiap mikroorganisme dengan t (waktu pengamatan) yaitu 6 jam, 12 jam, 24 jam, 48 jam, 72 jam, 96 jam, 120 jam, 144 jam, 168 jam dan 192 jam. Jumlah sel mikroorganisme/ml, *P. aeruginosa* sebesar $2,42E^{+14}$ /ml, *A. hydrophila* sebesar $2,99E^{+14}$ /ml, *A. radiobacter* sebesar $2,42E^{+14}$ /ml, kultur tercampur (Penggabungan 3 bakteri dominan) sebesar $2,89E^{+14}$ /ml, dan kultur tercampur sebesar $4,65E^{+14}$ /ml. Urutan penyisihan rata-rata biodegradasi dari yang paling optimum adalah kultur tercampur mikroorganisme, *P. aeruginosa*, *A. hydrophila*, kultur tercampur (Penggabungan 3 bakteri dominan), dan *A. radiobacter* sebesar 92%, 90%, 88%, 84%, dan 79%. Mikroorganisme yang bekerja pada awal substrat dan memiliki 2 kali fase eksponensial adalah *Pseudomonas aeruginosa* dengan masa pertumbuhan yang panjang yaitu maksimum selama 84 jam dan fase lag 6 jam. Hasil penentuan parameter kinetika untuk kultur tercampur mikroorganisme pada salinitas 15% yaitu $\mu=0,0172-0,5620$ /jam, $\mu_m = 0,0277$ /jam, $K_s = 253,988$ mg/L, $Y = 9,7989$, $q = 0,0018-0,0574$ /jam, $Y_t = 0,0066$, $Y_{obs} = 0,0033-0,0041$, $K_d = 0,0106-0,5554$ /jam, sedangkan untuk salinitas air laut adalah $\mu = 0,1048-0,5241$ /jam, $\mu_m = 0,1757$ /jam, $K_s = 12162,9866$ mg/L, $Y = 0,6887$, $q = 0,1522-0,7612$ /jam, $Y_t = 0,6887$, $Y_{obs} = 0,1048-0,5242$, $K_d = 0,1645-0,5839$ /jam. Penyisihan minyak bumi terbesar (98,57%) oleh mikroorganisme kultur tercampur pada skala pilot selama 10 hari, terjadi pada TPH 7%.

Kata kunci : Bioremediation, Salinity, Biodegradation of petroleum, Identification, Kinetic, Pilot scale.

Abstract : The kinetics parameter of μ , μ_{maks} , Y , Y_t , Y_{obs} , K_d , K_s , are obtained from both determining decreasing TPH concentration and enumeration of microorganism growth using VSS (Volatile Suspended Solid) method from each microorganism on each TPH concentration on observation times are 6, 12, 24, 48, 72, 96, 120, 144, 168 and 192 hours. Total sel microorganisms per ml in exponential phase are, *P. aeruginosa* = $2,42E^{+14}$ /ml, *A. hydrophila* = $2,99E^{+14}$ /ml, *A. radiobacter* = $2,42E^{+14}$ /ml, mixed culture (3 dominant bacteria) = $2,89E^{+14}$ /ml and mixed culture microorganisms = $4,65E^{+14}$ /ml. The average sequence of degradation from the optimum growth are mixed culture = 92%, *P. aeruginosa* = 90%, *A. hydrophila* = 88%, and *A. radiobacter* = 79%. Microorganism which works in first time dan has 2 times exponential phase is *Pseudomonas aeruginosa* with very long growth time that is about 84 hours (maximum) dan lag phase about 6 hours. The kinetics parameter was gained from mixed culture microorganisms in 15% salinity are $\mu = 0,0172-0,5620$ /hr, $\mu_m = 0,0277$ /hr, $K_s = 253,988$ mg/L, $Y = 9,7989$, $q = 0,0018-0,0574$ /hr, $Y_t = 0,0066$, $Y_{obs} = 0,0033-0,0041$, $K_d = 0,0106-0,5554$ /hr, where as in seawater salinity are $\mu = 0,1048-0,5241$ /hr, $\mu_m = 0,1757$ /hr, $K_s = 12162,9866$ mg/L, $Y = 0,6887$, $q = 0,1522-0,7612$ /hr, $Y_t = 0,6887$, $Y_{obs} = 0,1048-0,5242$, $K_d = 0,1645-0,5839$ /hr. The biggest degradation of petroleum (98,57%) by mixed culture microorganisms in pilot scale, happened in 7% TPH concentration for 10 days.

Keywords : Kinetics, biodegradation, salinity, crude oil.

PENDAHULUAN

Semua proses pengolahan air limbah berlangsung dalam suatu volume yang didefinisikan dengan batas-batas tertentu. Volume semacam itu biasanya disebut suatu reaktor. Perubahan-

perubahan komposisi dan konsentrasi material-material yang terjadi ketika air limbah ditahan dalam suatu reaktor merupakan faktor penting dalam pengolahan air limbah. Perubahan-perubahan ini disebabkan oleh transportasi hidrolis dari material tersebut ke dalam dan keluar reaktor maupun oleh reaksi yang berlangsung dalam reaktor. Untuk mendefinisikan secara sempurna (penuh) suatu sistem reaktor dan merancang reaktor tersebut maka perlu untuk mengetahui kecepatan perubahan-perubahan yang terjadi dan tingkat-tingkat perubahan tersebut. Tenaga ahli (engineer) yang sedang merancang suatu proses biologis biasanya tertarik pada kecepatan berbagai komponen (seperti material-material organik) dipisahkan dari air limbah dan kecepatan biomassa diproduksi dalam reaktor. Kecepatan perubahan semacam itu adalah penting karena akan langsung mempengaruhi ukuran reaktor yang diperlukan untuk suatu tingkat pengolahan tertentu. Untuk dapat merancang secara efektif proses pengolahan air limbah biologis, diperlukan dasar-dasar pengertian mengenai kebutuhan nutrisi mikroorganisme, faktor-faktor lingkungan yang mempengaruhi pertumbuhan mikroba, metabolisme mikroorganisme, dan hubungan antara pertumbuhan mikroba dan utilisasi (pemanfaatan) substrat. Oleh karena itu pada penelitian ini berguna untuk mempelajari laju pertumbuhan mikroba dalam setiap variasi perlakuan dan hubungannya dengan pemanfaatan substrat.

Laju pertumbuhan atau yang biasa disebut laju pertumbuhan spesifik dapat dirumuskan :

$$\frac{dX}{dt} = \mu X \quad (1)$$

$$\mu = \frac{1}{X} \frac{dX}{dt} \quad (2)$$

$$\mu = \mu_g - kd \quad (3)$$

Dimana : X = konsentrasi massa sel
 t = waktu
 μ = laju pertumbuhan spesifik (1/waktu)
 μ_g = laju pertumbuhan
 kd = laju kehilangan jumlah sel karena kematian atau metabolisme

METODOLOGI PENELITIAN

Bahan. Medium dasar yang digunakan dalam penelitian ini adalah Minimum Medium. Minyak bumi ditambahkan sebagai substrat/sumber karbon.

Alat. Skala pilot dengan sistem Batch berukuran 20x10x10 cm dengan atap terbuka volume cairan yang akan dimasukkan ke dalam rektor sebesar 2/3 dari volume rektor tersebut yaitu 1000 ml. Skala *Pilot* dibuat dalam medium berskala kecil dengan kondisi lingkungan perairan laut. Pemberian nutrisi untuk perbandingan rasio C : N : P = 100 : 5 : 1 dengan menambahkan unsur N (nitrogen) dari pupuk urea dan P (phospor) dari pupuk TSP.

Pengukuran Variabel Bahan Organik. Terjadinya degradasi minyak bumi dengan menghitung biomassa sel mikroorganisme (mgVSS/liter) yang teruapkan.

Pengukuran Variabel Fisik/Kimia. Secara fisik/kimia terjadinya degradasi diamati dengan menimbang berat minyak bumi sisa hasil degradasi secara gravimetri dan menganalisisnya dengan metode penyisihan minyak dan lemak.

HASIL DAN DISKUSI

Kinetika Pertumbuhan Tercampur Mikroorganisme pada Berbagai Perlakuan

Kinetika penyisihan minyak bumi oleh mikroorganisme diteliti dengan variasi konsentrasi dan mikroorganisme. Mikroorganisme yang digunakan dalam setiap perlakuan untuk mengetahui laju pertumbuhannya adalah mikroorganisme hasil isolasi, antara lain: *Pseudomonas aeruginosa*, *Aeromonas hydrophila*, dan *Agrobacterium radiobacter*. Variasi konsentrasi dilakukan untuk mengetahui kemampuan biodegradasi mikroorganisme dari konsentrasi TPH rendah hingga konsentrasi TPH tinggi dengan minimum medium tanpa karbon. Hal ini dimaksudkan untuk memastikan sumber karbon untuk kebutuhan mikroorganisme berasal dari limbah minyak bumi.

Penentuan parameter kinetika penyisihan minyak bumi oleh mikroorganisme dilakukan dengan penentuan 2 parameter yaitu pertumbuhan mikroorganisme dan konsentrasi minyak bumi. Parameter pertumbuhan mikroorganisme (X) diukur sebagai VSS untuk menentukan jumlah biomassa dan parameter konsentrasi minyak bumi (S) diukur sebagai TPH untuk menentukan jumlah substrat.

Perhitungan laju pertumbuhan spesifik mikroorganisme (μ) dihitung dengan rumus (1.1). Penentuan laju pertumbuhan spesifik maksimum (μ_m) dan konstanta kejenuhan (K_s) dihasilkan dari persamaan Lineweaver-burk plot.

Persamaan Lineweaver-burk plot dilakukan dengan membandingkan $1/\mu$ pada sumbu y dan $1/S$ pada sumbu x sehingga menghasilkan garis lurus dengan slope K_s/μ_m . Hasil pertumbuhan (Y) didapatkan dari perbandingan X_{max} (konsentrasi biomassa maksimum) pada sumbu y dan S_0 (substrat pembatas pertumbuhan) pada sumbu x. Kurva yang dihasilkan akan membentuk garis linier dengan kemiringan (slope) $-Y$. Laju utilisasi substrat (q) diperoleh dengan menggunakan rumus (1.2) dan hasil pertumbuhan nyata (Y_t) diperoleh dari perbandingan laju utilisasi substrat spesifik (q) pada sumbu x dengan laju pertumbuhan spesifik (μ) pada sumbu y. Garis linear yang dihasilkan akan membentuk kemiringan (slope) $1/Y_t$ dan perpotongan sumbu y di titik b . Penentuan konstanta kematian (K_d) dan hasil pertumbuhan yang diobservasi (Y_{obs}) adalah dengan rumus (1.3) hal 49 dan rumus (2.24).

Nilai-nilai parameter kinetika telah dirangkum dapat dilihat dari tabel 1, 2, 3, dan 4 di bawah ini.

Tabel 1. Nilai Parameter Kinetika Biodegradasi Minyak Bumi oleh *P. aeruginosa* dan *A. hydrophila* pada Berbagai Salinitas.

Parameter Kinetika	Mikroorganisme					
	<i>P. aeruginosa</i>			<i>A. hydrophila</i>		
	S. 15%	S. 10%	Air Laut	S. 15%	S. 10%	Air Laut
μ (1/jam)	0.0172 - 0.1837	0.0139-0.1574	0.0127 - 0.1525	0.0092 - 0.2506	0.00107-0.08431	0.0177 - 0.2857
μ_{maks} (1/jam)	0.0599	0.10022	0.0635	0.0399	0.002	0.0481
K_s (mg/l)	2770.109	70277.75	2321.62	2739.5669	85620.831	826.7667
Y	0.9535	0.5087	0.0754	1.8212	0.2283	0.0453
q (1/jam)	0.0179 - 0.1926	0.02724-0.30939	0.1689 - 2.0225	0.0051 - 0.1377	0.00469-0.36928	0.3899 - 6.3077
Y_t	0.95347	0.5087	0.0754	1.8212	0.2283	0.0453
Y_{obs}	0.0172 - 0.1837	0.01386-0.027	0.0127 - 0.0608	0.0092 - 0.2506	0.00107-0.08431	0.0099 - 0.02099
K_d (1/jam)	0.7698 - 0.9363	0.35131-0.49484	0.0219 - 0.0771	0.0022 - 0.4742	0.14399-0.28358	0.0629 - 0.3310

Tabel 2. Nilai Parameter Kinetika Biodegradasi Minyak Bumi oleh *A. radiobacter* dan 3 Bakteri pada Berbagai Salinitas.

Parameter Kinetika	Mikroorganisme					
	<i>A. radiobacter</i>			3 Bakteri		
	S. 15%	S. 10%	Air Laut	S. 15%	S. 10%	Air Laut
μ (1/jam)	0.0131 - 0.1841	0.01252-0.50841	0.0087 - 0.1933	0.0194 - 0.4735	0.01212-0.01968	0.0086 - 0.2896
μ_{maks} (1/jam)	0.0297	0.017	0.05	0.0622	0.02316	0.0558
K_s (mg/l)	83.2724	67850.374	11592.5382	1713.71896	11560.516	8378.096
Y	1.4735	1.0703	0.0436	0.3416	0.953	0.2061
q (1/jam)	0.0089 - 0.1249	0.01169-0.47501	0.1991 - 4.4344	0.0419 - 1.3860	0.01272-0.02065	0.0418 - 1.4052
Y_t	1.4734	1.07032	0.0436	0.3416	0.953	0.2061
Y_{obs}	0.0131 - 0.1841	0.012516-0.508408	0.0087 - 0.0379	0.0194 - 0.2672	0.019683-0.012118	0.0086 - 0.1599
K_d (1/jam)	1.2894 - 1.5150	0.56191-1.05780	0.0077 - 0.1498	0.1319 - 0.3273	0.93332-0.94088	0.0835 - 0.1975

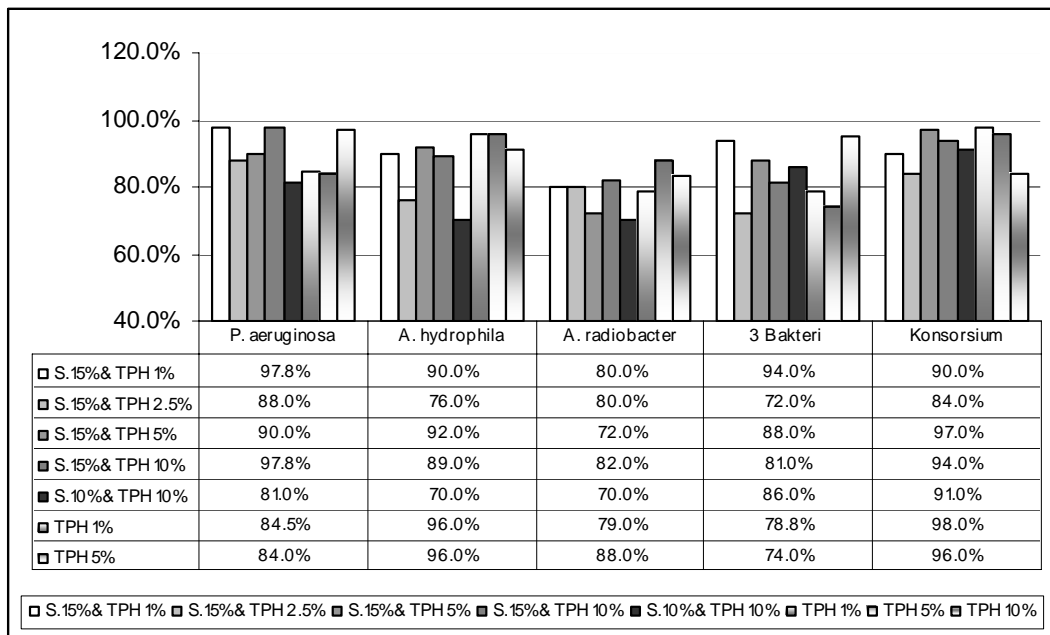
Tabel 3. Nilai Parameter Kinetika Biodegradasi Minyak Bumi oleh Mikroorganisme Kultur Tercampur pada Berbagai Salinitas.

Parameter Kinetika	Mikroorganisme Kultur Tercampur		
	S. 15%	S. 10%	Air Laut
μ (1/jam)	0.0172 - 0.5620	0.02716-0.04766	0.1048 - 0.5241
μ_{maks} (1/jam)	0.0277	0.1037	0.1757
K_s (mg/l)	253.988	73663.947	12162.9866
Y	9.7989	6.7778	0.6887
q (1/jam)	0.0018 - 0.0574	0.00344-0.00703	0.1522 - 0.7612
Y_t	0.0066	6.77966	0.6887
Y_{obs}	0.0033 - 0.0041	0.0232922-0.0476639	0.1048 - 0.5242
K_d (1/jam)	0.0106 - 0.5554	6.732-0.75637	0.1645 - 0.5839

Kampfer *et al* (1991) yang mengamati perairan selatan kota Berlin (North German Lowland) menjumpai jumlah bakteri pengurai minyak bervariasi antara 0,1-10/100 ml sampel. Penelitian Bartha (1986) di pulau Embiez Perancis, diperoleh hasil isolasi bakteri pada perairan tersebut berkisar antara 1,2-1,8E⁴/100 ml sampel dan hasil penelitian Feliatra pada perairan Dumai terdapat 2800-4300 bakteri/100ml sampel.

Laju pertumbuhan spesifik maksimum mikroorganisme dalam penelitian ini terjadi pada pertumbuhan kultur tercampur mikroorganisme sebesar 0.0089-0.1048 /hari. Hasil penelitian Feliatra (1996), tingkat biodegradasi maksimal minyak bumi di perairan Dumai sebesar 0,0006-0,022 /hari. Sedangkan hasil penelitian oleh Atlas dan Bartha (1981) pada kultur murni biodegradasi minyak mencapai 0,416-4 per hari.

Tabel 5. Penyisihan Minyak Bumi oleh Mikroorganisme dalam waktu 8 hari.



Penyisihan minyak bumi oleh berbagai mikroorganisme dan variasi salinitas dan TPH dapat dilihat pada Tabel 5 di atas. Penyisihan terbesar terjadi pada mikroorganisme kultur tercampur dengan kondisi salinitas air laut & TPH 1% yaitu sebesar 98%. Penyisihan rata-rata untuk *P. aeruginosa* sebesar 90%, *A. hydrophila* sebesar 88%, *A. radiobacter* sebesar 79%, penggabungan 3 bakteri 84%, dan mikroorganisme kultur tercampur sebesar 92%. Dari hasil penyisihan tersebut membuktikan bahwa dengan penggabungan bakteri lebih efektif dalam menyisihkan substrat (minyak bumi) karena mikroorganisme dapat bersinergi dalam memotong rantai karbon.

P. aeruginosa dapat bekerja lebih efektif jika dibandingkan dengan mikroorganisme yang lain karena mempunyai kemampuan penyisihan lebih baik.

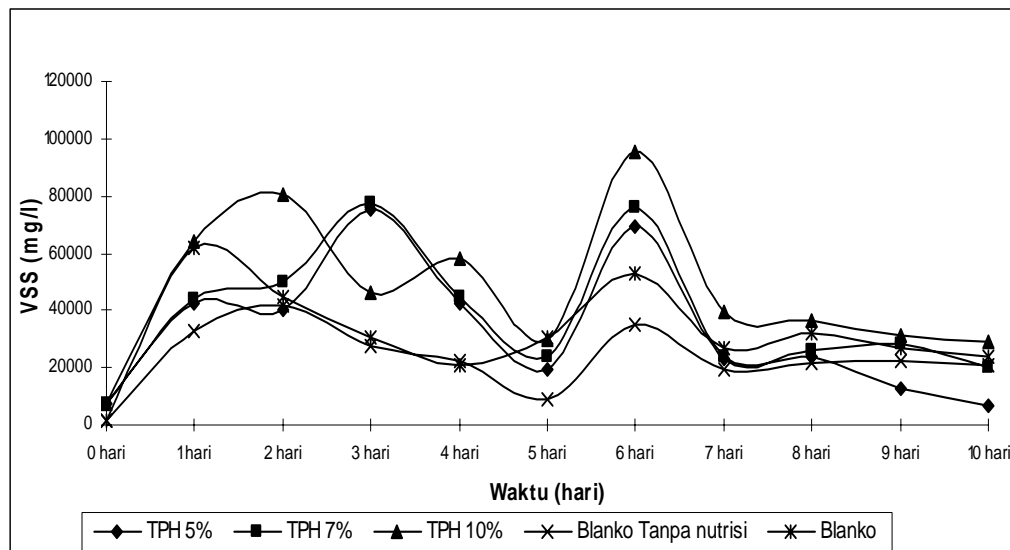
Pertumbuhan pada Skala Pilot

Hasil pertumbuhan biomassa sel mgVSS/l dan jumlah sel/ml (TPC) pada uji perlakuan dapat dilihat bahwa pertumbuhan mikroorganisme kultur tercampur lebih optimum jika dibandingkan dengan pertumbuhan bakteri per individu. Hal tersebut yang mendasari pemilihan mikroorganisme kultur tercampur untuk mendegradasi minyak bumi.

Pertumbuhan mikroorganisme kultur tercampur dalam suatu skala *pilot* dapat diketahui dari kurva pertumbuhan dengan perbandingan jumlah populasi mikroorganisme dalam mendegradasi minyak bumi dengan waktu biodegradasi. Jumlah populasi mikroorganisme dinyatakan dengan

mgVSS/l. Pada penelitian dalam skala *pilot*, mikroorganisme kultur tercampur diberi perlakuan dengan variasi TPH 5%, 7%, dan 10% dalam suatu media air laut dan variasi blanko dengan nutrisi dan tanpa nutrisi. Dasar pemilihan Waktu pengamatan setiap 24 jam selama 10 hari dan suhu berkisar antara 30°C dengan maksud untuk mengkondisikan lingkungan seperti di laut.

Pertumbuhan mikroorganisme yang paling optimum terlihat pada kondisi dengan TPH 10% dimana mikroorganisme kultur tercampur mengalami 2 kali fase eksponensial yaitu setelah hari ke-1 dengan jumlah populasi mikroorganisme sebesar 80400 mgVSS/l dan hari ke-5 dengan jumlah populasi yang lebih besar lagi yaitu 95744 mgVSS/l.



Gambar 1. Kurva pertumbuhan *pilot* kultur tercampur dengan salinitas air laut pada pH 6,8 - 7,2 dan temperatur 30°C.

Kondisi ini membuktikan pertumbuhan mikroorganisme hidup dengan optimum sesuai rasio perbandingan karbon (C), nitrogen (N), dan fosfor (P). Fase lag pada kondisi ini hanya 1 hari sesuai dengan kurva pertumbuhan awal mikroorganisme kultur tercampur, sedangkan fase stasioner terjadi setelah hari ke-7 dan fase kematian setelah hari ke-8 dengan jumlah populasi mikroorganisme sebesar 28727 mgVSS/l.

Fase pertumbuhan mikroorganisme pada TPH 7% dan TPH 5% hampir sama yaitu mengalami 2 kali fase eksponensial dalam waktu yang sama. Fase eksponensial pertama selama 3 hari, dengan peningkatan biomassa sel berkisar 68030 mgVSS/l (90%). Fase eksponensial yang kedua terjadi saat memasuki hari ke-6 dengan peningkatan biomassa sel berkisar 49974 mgVSS/l (72%). Fase stasioner pada hari ke-7 dan fase kematian pada hari ke-8 dengan jumlah populasi mikroorganisme sebesar 7024 mgVSS/l (TPH 5%) dan 19974 mgVSS/l (TPH 7%). Perlakuan pada TPH 10%, mikroorganisme juga mengalami 2 kali fase eksponensial dalam 8 hari waktu pengamatan.

Ketiga variasi TPH tersebut mengalami 2 kali fase eksponensial, hal itu membuktikan bahwa mikroorganisme kultur tercampur dapat tumbuh dengan optimum dalam suatu kondisi lingkungan dengan perbandingan jumlah nutrisi yang sesuai dan pada pH netral dengan temperatur 30°C.

Proses biodegradasi senyawa hidrokarbon sampai sempurna tidak mungkin dilakukan hanya oleh satu bakteri, tetapi selalu dilakukan oleh suatu kumpulan mikroorganisme secara sinergistik (Atlas dan Bartha, 1995). Selain itu jenis bakteri yang siap mendominasi kultur tercampur memiliki gen-gen pengatur enzim yang membutuhkan waktu adaptasi sebelum mampu menggunakan fraksi hidrokarbon yang tersedia. Degradasi dilakukan dengan cara memotong rantai hidrokarbon tersebut menjadi lebih pendek dengan melibatkan berbagai enzim.

Sistem enzim-enzim tersebut dikode oleh kromosom atau plasmid, tergantung pada jenis bakterinya (Ashok dkk, 1995).

Pada awal pertumbuhan tanpa mikroorganisme (blanko) hasil isolasi dan tanpa nutrisi, dimulai fase lag (adaptasi) dan diikuti dengan penurunan jumlah populasi mikroorganisme yang sangat tajam sebesar 23014 mgVSS/l selama 5 hari, hal ini terjadi kemungkinan disebabkan ketidakseimbangan rasio perbandingan jumlah nutrisi sehingga mikroorganisme memerlukan waktu untuk beradaptasi lebih lama. Menurut Atlas dan Bartha (1981) penambahan 10mM nitrat dan 0,3mM fosfat dapat meningkatkan aktifitas biodegradasi dari 30% menjadi 70%.

Oliveri *et al* (1976) yang melakukan penelitian tentang perairan Mediteran menemukan bahwa penambahan sejumlah $MgNH_4PO_4$ sebagai kombinasi nitrogen dan fosfor dapat meningkatkan biodegradasi petroleum dari 40% menjadi 63% dalam jangka waktu tiga minggu.

Setelah melewati fase adaptasi kemudian diikuti dengan fase eksponensial yang ditandai dengan peningkatan jumlah populasi selama 1 hari menjadi 52756 mgVSS/l. Peningkatan jumlah populasi ini kemungkinan disebabkan mikroorganisme dapat memanfaatkan substrat yang cocok dengan keterbatasan nutrisi. Fase stasioner setelah hari ke-8 kemudian diikuti dengan fase kematian dengan jumlah populasi mikroorganisme sebesar 20935 mgVSS/l.

Pertumbuhan tanpa mikroorganisme (blanko) hasil isolasi tetapi dengan penambahan nutrisi, mengalami penurunan biomassa sel dari 62020 mgVSS/l menjadi 20817 mgVSS/l dalam waktu 4 hari. Fase eksponensial terjadi setelah melewati hari ke-4 dengan peningkatan biomassa sel sebesar 31939 mgVSS/l (60,54%), nilai ini masih dibawah nilai pertumbuhan awal pada hari pertama. Fase stasioner berlangsung pada hari ke-7 dan fase kematian pada hari ke-8 dengan jumlah populasi mikroorganisme sebesar 24223 mgVSS/l.

Penyisihan minyak bumi ditandai dengan penurunan konsentrasi minyak bumi sisa di dalam suatu perlakuan skala pilot. Penyisihan untuk TPH 5% sebesar 98,57%, TPH 7% sebesar 83%, TPH 10% sebesar 97%, blanko dengan nutrisi 94% dan blanko tanpa nutrisi 80%.

KESIMPULAN

Dari hasil perhitungan dengan menggunakan beberapa persamaan dalam penentuan kinetika parameter, maka diperoleh nilai kinetika degradasi dari rentang konsentrasi TPH 2.5 %, 5 %, 7.5 %, 10 % dan 15 % pada temperatur kamar dan pH 6.8 – 7.2 untuk *Pseudomonas aeruginosa* sebagai berikut: $\mu = 0,0127-0,1269/\text{jam}$, $\mu_m = 0,0572/\text{jam}$, $K_s = 4758,39 \text{ mg/L}$, $Y = 0,3511986$, $q = 0,0363-0,3614/\text{jam}$, $Y_{obs} = 0,0127 - 0,1269$, dan $K_d = 0,2243-0,3385$. Untuk *Aeromonas hydrophila*: $\mu = 0,0104 - 0,386 /\text{jam}$, $\mu_m = 0,039909/\text{jam}$, $K_s = 2739,5669 \text{ mg/L}$, $Y = 0,0881$, $q = 0,1177 - 4,3820/\text{jam}$, $Y_{obs} = 0,0104 - 0,0859$, dan $K_d = 0,0022 - 0,4712 /\text{jam}$. Untuk *Agrobacterium radiobacter*: $\mu = 0.0087-0.19334/\text{jam}$, $\mu_m = 0.0699/\text{jam}$, $K_s = 8818.1383 \text{ mg/L}$, $Y = 0.1338$, $q = 0.0649-1.4449/\text{jam}$, $Y_{obs} = 0.0087-0.1261$, dan $K_d = 0.0077-0.3271 /\text{jam}$. Pada penggabungan *P. aeruginosa*, *A. hydrophila*, *A. radiobacter*: $\mu = 0.0121-0.1023/\text{jam}$, $\mu_m = 0.0013/\text{jam}$, $K_s = 9.3132 \text{ mg/L}$, $Y = 0.0066$, $q = 1.8361-15.4988/\text{jam}$, $Y_{obs} = 0.0034-0.0045$, dan $K_d = 0.0055-0.0957/\text{jam}$. Untuk mikroorganisme kultur tercampur $\mu = 0.0089 - 0.1048/\text{jam}$, $\mu_m = 0.022/\text{jam}$, $K_s = 109.8973 \text{ mg/L}$, $Y = 0.1312$, $q = 0.0676 - 0.7989/\text{jam}$, $Y_{obs} = 0.0034 - 0.0053$, dan $K_d = 0.0023 - 0.0982/\text{jam}$.

Penyisihan minyak bumi terbesar oleh mikroorganisme kultur tercampur pada skala *pilot* dengan salinitas air laut, yaitu pada TPH 5% sebesar 98,57%.

SARAN

Diperlukan perhitungan lanjutan agar dapat ditentukan dimensi dari reaktor yang optimum sesuai dengan kinetika mikroorganisme tersebut.

Daftar Pustaka

- Chator, AKW dan H.J. Somerville. The Oil Industry and Microbial Ecosystems. The Institute of Petroleum: London, 1977.
- Cookson Jr, John. T. Bioremediation Engineering Design and Application. Mc Graw Hill, Inc. USA, 1995.
- Edward, Clive. Microbiology of Extreme Environment. McGraw-Hill: Buckingham, 1990.
- Feliatra, 1998. "Isolasi, identifikasi dan tingkat penguraian produk minyak bumi oleh bakteri pada Perairan Selat Malaka". Prosiding Seminar "Bioteknologi Kelautan Indonesia I '98" Jakarta 14-15 Oktober 1998: 291-303.
- Fingas, Merv. The Basic of Oil Spill Cleanup. Lewis Publisher. New York, Washington, D.C, 2001.
- Molnaa, B.A. dan R.B Grubbs. Using Microbial Consortia as a Inoculum, Solmar Cooperation, USA, 2005.
- Stephen T. Abedon. Growth and Culturing of Bacteria. Ohio State University. USA, 1999.
- Stephen T. Abedon. Microbial Growth. Ohio State University. USA, 2003.
- Udiharto, M. 1996. Bioremediasi Minyak Bumi. Cibinong. Prosiding dan Pelatihan Lokakarya "Peranan Bioremediasi dalam Pengelolaan Lingkungan". Cibinong 24-28 Juni 1996: 24-39.