

DISOLVED OXYGEN PERFORMANCE IN DEGRADATION OF TOTAL PETROLEUM HYDROCARBONS BY EX SITE ACTIVATED SLUDGE

Abubakar Tuhuloula

Chemical Engineering Department, Universitas Lambung Mangkurat
Jl. A. Yani Km. 36 Banjarbaru, Indonesia

E-mail corresponding author: atuhuloula@ulm.ac.id

ARTICLE INFO	ABSTRACT
<p><i>Article history:</i> Received: 08-10-2020 Received in revised form: 16-10-2020 Accepted: 17-10-2020 Published: 18-10-2020</p> <hr/> <p><i>Keywords:</i> Total petroleum hydrocarbon Remediation Dissolved oxygen Activated sludge</p>	<p><i>Contamination of soil by the activities of exploration, production and disposal of oil waste into the environment causes serious damage to the environmental ecosystem, the target of processing by the activated sludge as a model for remediation of petroleum contaminated site. Optimization of oxygen supply becomes special attention in aerobic bioprocess for optimizing the growth of microorganisms to degrade total petroleum hydrocarbons. Thus, the study was focused on determining the performance of dissolved oxygen in degradation of total petroleum hydrocarbons by ex situ activated sludge. The research used biological methods (bioremediation), with the ratio of contaminated soil to water was 20:80%(w/v) and a soil size 40/50 mesh. The degradation process was carried out with 15% and 20% (v/v) activated sludge put into the bioreactor slurry with a capacity of 4 liters and stirring was 90 rpm at a temperature of 30°C as well as aeration and nutrient injection into the bioreactor. TPH analysis was measured by the gravimetric method. The results obtained showed that the performance of dissolved oxygen increased well in the bioreactor slurry at 15% (v/v) and 20% (v/v) activated sludge concentrations was 3.31–8.57 mg/L and 3.5–8.21 mg/L respectively, which had an impact on the level of TPH degradation, namely from 18,000 µg/g to 2870 µg/g and 18,000 µg/g to 1970 µg/g during the 49 days remediation period. In general, activated sludge shows good performance throughout the remediation period.</i></p>

PERFORMA OKSIGEN TERLARUT DALAM DEGRADASI TOTAL PETROLEUM HYDROCARBONS MENGGUNAKAN ACTIVATED SLUDGE SECARA EX SITU

Abstrak-Pencemaran tanah oleh kegiatan eksplorasi, produksi dan pembuangan limbah minyak ke lingkungan menyebabkan kerusakan serius pada ekosistem lingkungan, target pengolahan oleh *activated sludge* sebagai model untuk remediasi situs yang tercemar minyak bumi. Optimalisasi suplai oksigen menjadi perhatian khusus dalam bioproses aerobik untuk mengoptimalkan pertumbuhan mikroorganisme dalam mendegradasi total petroleum hidrokarbon. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan menentukan performa oksigen terlarut dalam degradasi *total petroleum hydrocarbons* dengan *activated sludge* secara *ex situ*. Penelitian ini menggunakan metode biologi (bioremediasi), dengan rasio tanah tercemar terhadap air adalah 20:80% (w/v) dan ukuran tanah 40/50 mesh. Proses degradasi dilakukan dengan 15% dan 20% (v/v) *activated sludge* dimasukkan ke dalam *slurry bioreactor* berkapasitas 4 liter dan pengadukan 90 rpm dengan temperatur 30°C serta aerasi dan injeksi nutrisi ke dalam bioreaktor tersebut. Analisa TPH diukur dengan metode gravimetri. Hasil yang di peroleh memperlihatkan performa oksigen terlarut meningkat dengan baik dalam *slurry bioreactor* pada konsentrasi *activated sludge* 15%(v/v) dan 20% (v/v) berurutan adalah 3,31–8,57 mg/L dan 3,5–8,21 mg/L yang berdampak pada tingkat degradasi TPH yaitu dari 18.000 µg/g menjadi 2870 µg/g dan 18.000 µg/g menjadi 1970 µg/g selama 49 hari periode remediasi. Secara umum *activated sludge* memperlihatkan kinerja yang baik sepanjang periode remediasi.

Kata kunci: *total petroleum hydrocarbons*, remediasi, oksigen terlarut, *activated sludge*

PENDAHULUAN

Minyak bumi adalah produk alami, terdiri dari campuran hidrokarbon kompleks, yang dihasilkan dari dekomposisi sisa-sisa tumbuhan dari periode karbon di bawah suhu dan tekanan tinggi [van Hamme dkk, 2003]. Total petroleum hidrokarbon (TPH) adalah istilah yang digunakan untuk campuran hidrokarbon yang ditemukan dalam minyak bumi. TPH adalah jumlah dari *volatil petroleum hidrokarbons* (VPH) juga dikenal sebagai *petrol range organics* (PRO) dan termasuk hidrokarbon dari C₂–C₅. Dan *ekstraktabel petroleum hidrokarbon* (EPH) juga dikenal sebagai *Diesel range organics* (DRO) dan termasuk hidrokarbon dari C₆–C₄₀. [Lifrieri, 2014].

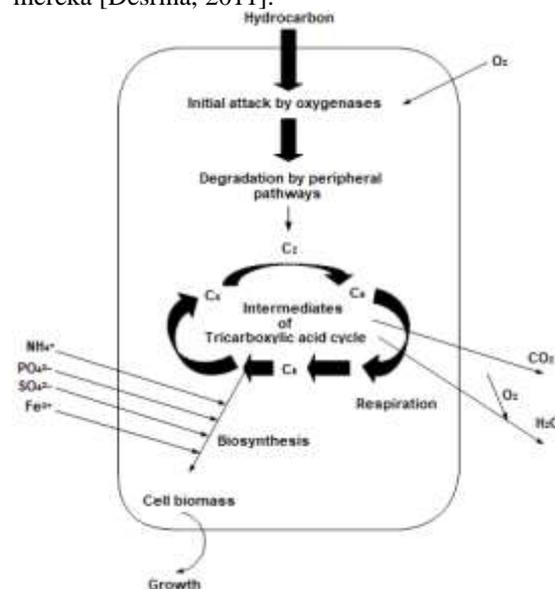
Pencemaran minyak bumi pada tanah dan air dari sumber industri dan aktifitas kegiatan lainnya adalah menghasilkan bencana ekologi dan memberikan masalah umum baru. Tumpahan minyak di lingkungan dalam jangka panjang menyebabkan kerusakan pada ekosistem air dan tanah, kesehatan manusia dan sumber daya alam (Liu, dkk, 2011). Tanah yang tercemar oleh minyak merupakan masalah yang kompleks, terkait dengan pergerakan komponen beracun di lingkungan seperti naftalena, fluorena, antrasena, fluoranthene, pyrene, dan TPH [Tuhuloula dkk, 2019]. Total petroleum hidrokarbon (TPH) adalah kontaminan yang ada area pengeboran dan memiliki dampak sangat besar terhadap lingkungan karena potensi toksisitas, mutagenisitas, dan karsinogenisitas.

Indonesia sebagai salah satu negara penghasil minyak bumi, produksi sekitar 830.000 barrel per hari [Widarsono, 2013]. Dari angka tersebut diperkirakan akan menimbulkan 1,3 juta barel limbah per tahun, 285.000 barrel diantaranya adalah limbah B3 [KESDM, 2015]. Jumlah tanah yang terkontaminasi minyak bumi yang dihasilkan dalam proses produksi minyak telah meningkat ribuan ton setiap tahun di Indonesia [Yudono dkk, 2009].

Limbah minyak bumi merupakan campuran kompleks yang mengandung fraksi alkana, aromatik, nitrogen, sulfur, oksigen, dan asphaltene. Oleh karena itu, sulit bagi bakteri spesies tunggal untuk membiodegradasi semua komponen minyak, hanya degradasi jenis senyawa minyak bumi tertentu, tetapi populasi mikroba komunitas memungkinkan laju degradasi yang lebih tinggi untuk beberapa fraksi minyak. Selain itu, beberapa zat dapat diuraikan hanya dengan cometabolism [Machin-Ramírez dkk, 2008; Milic dkk, 2009]. Berbagai upaya yang dilakukan untuk mengatasi pencemaran lingkungan dengan perbaikan pada sistem pengeboran, pengolahan, penyaluran minyak dan pengolahan limbah.

Telah banyak metode remediasi yang diterapkan pada lahan yang tercemar, terutama

lahan yang tercemar minyak bumi. Beberapa perusahaan perminyakan di Indonesia, khususnya di sektor hulu, telah menggunakan metode bioremediasi untuk menangani lahan yang tercemar minyak bumi, baik yang disebabkan oleh ledakan atau masalah selama pengangkutan di sekitar wilayah kegiatannya. Metode bioremediasi juga banyak digunakan pada kasus pencemaran pantai akibat kecelakaan kapal tanker minyak. Pemerintah Indonesia pun menekankan pentingnya metode bioremediasi dengan berlakunya Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No. 128, 2003, tentang Prosedur dan Persyaratan Teknis Pengolahan Limbah Minyak Bumi dan Tanah yang Terkontaminasi Secara Biologis oleh Minyak Bumi. Dengan berlakunya peraturan ini, beberapa perusahaan minyak di Indonesia, mis. UNOCAL di Kalimantan dan CPI di Sumatera, mencoba menggunakan metode ini di wilayah operasional mereka [Desrina, 2011].



Gambar 1. Prinsip utama degradasi aerobik hidrokarbon oleh mikroorganisme

Pemulihan area tercemar minyak bumi dapat dilakukan secara biologi dengan menggunakan kapasitas kemampuan mikroorganisme, fungsi dari mikroorganisme ini dapat mendegradasi struktur hidrokarbon yang ada dalam tanah yang terkontaminasi minyak bumi menjadi mineral-mineral yang lebih sederhana serta tidak membahayakan terhadap lingkungan. Teknik seperti ini disebut bioremediasi.

Lumpur aktif (*activated sludge*) adalah proses pertumbuhan mikroba tersuspensi. Proses ini pada dasarnya merupakan pengolahan aerobik yang mengoksidasi material organik menjadi CO₂ dan H₂O, NH₄ dan sel biomassa baru (Bitton, 1994). Keberhasilan pengolahan limbah secara biologi dalam batas tertentu diatur oleh

kemampuan bakteri untuk membentuk flok, dengan demikian akan memudahkan pemisahan partikel dan air limbah. Lumpur aktif adalah ekosistem yang kompleks yang terdiri dari bakteri, protozoa, virus, dan organisme-organisme lain [Anna dan Malte, 1994]. Permasalahan yang timbul akibat cemaran minyak bumi ini, dapat diatasi dengan pendekatan metode bioremediasi, dengan memanfaatkan mikroorganisme.

Degradasi paling cepat dan lengkap dari sebagian besar polutan organik terjadi dalam kondisi aerobik. Gambar 1 menunjukkan prinsip utama degradasi aerobik dari hidrokarbon [Wolfgang dan Martin, 2000; Das dan Chandran, 2011; Tuhuloula dkk, 2019].

Aktivitas mikroorganisme dalam merombak hidrokarbon ini, sangat ditunjang oleh transfer oksigen di dalam bakteri, yang menyebabkan kerja bakteri optimal disamping keberadaan nutrisi bagi bakteri tersebut. Namun hal ini perlu dicermati, tentang seberapa besar konsentrasi oksigen terlarut yang harus dimiliki oleh bakteri yang ada dalam limbah minyak bumi tersebut. Dalam menandai efisiensi aerasi, untuk memprediksi konsentrasi oksigen terlarut, dalam mengoptimalkan oksigen sebagai sumber tenaga bagi mikroorganisme dalam merombak kontaminan petroleum hidrokarbon di area yang tercemar. Studi mengenai kemungkinan peran *activated sludge (mixed culture)* secara aerobik dalam degradasi TPH masih sedikit di temukan. Oleh karena itu, tujuan dari penelitian ini adalah performa oksigen dengan memanfaatkan *activated sludge* dalam merombak total petroleum hidrokarbon di tanah tercemar minyak bumi secara *ex situ aerobik*.

METODE PENELITIAN

Pendekatan umum yang diambil dalam penelitian ini akan menjadi evaluasi intrinsik, kemampuan *activated sludge* secara aerobik dengan memperhatikan performa oksigen terlarut. Pengukuran oksigen terlarut menggunakan DOmeter Penggunaan tanah yang tercemar akan di degradasi menggunakan *activated sludge* pada fase slurry bioreaktor, memungkinkan interpretasi langsung kemampuan intrinsik dari *activated sludge* dan oksigen terlarut tanpa gangguan yang disebabkan oleh proses adsorpsi dan desorpsi. Hal ini juga menyebabkan terjadinya laju degradasi oleh bakteri yang rasional.

Sampel dan Pengolahan Tanah yang Tercemar

Tanah tercemar minyak bumi diperoleh lokasi pengeboran minyak Pertamina-UBEP Tanjung, Kalimantan Selatan. *Activated sludge* diperoleh dari PT. Bridgestone Kalimantan Plantation. Tanah tercemar kemudian dipisahkan

dari dedaunan, puing-puing serta benda-benda besar lainnya dan dipindahkan ke laboratorium. Tanah yang tercemar di *sreening* sampai ukuran 40/50 mesh, kemudian disterilkan untuk memperoleh tanah yang *free indigenous bacteria*

Proses Bioremediasi

Proses biodegradasi TPH dilakukan secara *ex situ* di Laboratorium Operasi Teknik Kimia, Program Studi Teknik Kimia – ULM Banjarbaru. Tanah yang tercemar dibentuk menjadi *slurry* dengan cara mencampurkan tanah-air dengan perbandingan 20:80. Kemudian *Activated sludge* ditambahkan ke dalam setiap *slurry bioreactor* dengan konsentrasi 15% dan 20% (v/v). Proses ini berlangsung dalam bioreaktor dengan volume kerja 4 L dengan pengadukan 90 rpm dan aerasi. Suhu operasi 30°C dan pH 6–8. Proses ini berlangsung dalam suasana aerob, karena udara dialirkan secara terus menerus untuk menjaga kondisi proses. Proses bioremediasi berlangsung selama 49 hari. Analisis TPH dilakukan setiap minggu, sedangkan suhu, pH dan DO dipantau setiap hari. Oksigen terlarut harus lebih dari 2 mg O₂/L

Analisa Total Petroleum Hidrokarbon (EPA Method 1664; Tuhuloula, 2011)

Analisa konsentrasi degradasi TPH dengan metode gravimetri. Sebanyak 10 gram tanah diekstrak dengan *n*-heksana selama 8 jam. Disaring dengan menggunakan penyaring *buchner*. Kandungan air pada ekstrak tanah dihilangkan dengan menambahkan 10 gr Na₂SO₄ anhidrat, sedangkan pelarut dihilangkan dengan dipanaskan pada suhu 70°C selama 45 menit, ekstrak pekat didinginkan dalam desikator dan ditimbang. Bobot yang terukur adalah *oil and grease*. Sampel hasil pengeringan dilarutkan kembali dengan *n*-heksana dan ditambahkan silika gel untuk menghilangkan senyawa-senyawa polar kemudian disaring. Pelarut diuapkan kembali dan dipanaskan selama 45 menit pada suhu 70°C. Bobot yang terukur merupakan total petroleum hidrokarbon. Persen degradasi TPHs di hitung sesuai dengan persamaan :

$$\text{Degradasi TPH (\%)} = \frac{[TPH]_0 - [TPH]_n}{[TPH]_0} \times 100$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

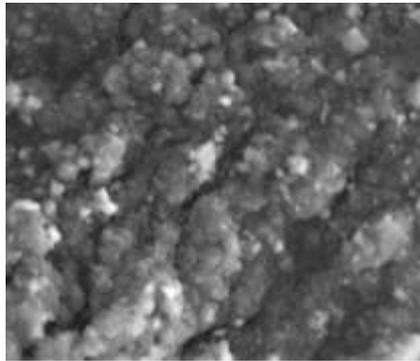
Karakterisasi Tanah Tercemar Minyak Bumi dengan SEM

Berdasarkan Keputusan Menteri Lingkungan Hidup RI No. 128 Tahun 2003, TPH pada tanah yang tercemar minyak bumi terlalu jauh di atas baku mutu (hasil olahan akhir secara biologi adalah 10.000 µg/g). Karena itu tanah perlu di olah sebelum di lepas ke lingkungan.

Tabel 1. Karakteristik tanah dari *drill sites* Pertamina UBEP Tanjung, Kalimantan Selatan

Parameter	Karakteristik
Warna	Coklat
pH	9
Temperatur (°C)	28
*Konsentrasi TPH ($\mu\text{g/g}$)	18.000

* Analisa menggunakan metode gravimetri

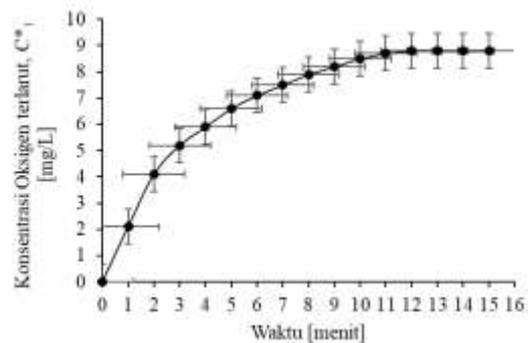
**Gambar 2.** Bentuk dan Morfologi Tanah Tercemar Minyak Bumi

Analisa SEM (*Scanning Electron Microscope*) menggunakan SEM FEI INSPECTION S50 untuk menyelidiki pencitraan permukaan tanah tercemar minyak bumi. Partikel tanah ini dianalisis oleh detektor yang berbeda yang memungkinkan untuk merekonstruksi gambar tiga dimensi dari permukaan. SEM ini dilakukan pada pembesaran 10000 kali dengan skala $100\ \mu\text{m}$ seperti pada gambar 2, memperlihatkan struktur, permukaan dan morfologi tanah tercemar minyak bumi sangat padat dan tertutupi oleh lapisan minyak. Menunjukkan bahwa minyak sudah terserap masuk ke dalam tanah dan membuat perubahan pada morfologi dan struktur serta bioavailabilitas tanah tersebut. Hal ini akan berdampak pada kesulitan performa oksigen dan *activated sludge* melakukan *reakdown* kontaminan di lokasi pencemaran itu.

Dari hasil pengukuran pada perbesaran 10000 kali, diketahui bahwa tanah tercemar terdiri dari partikel tanah dengan ukuran yang tidak seragam. Hal ini dapat terjadi karena tanah yang di uji SEM tidak melalui proses *screening* terlebih dahulu, sehingga distribusi ukuran partikel tanah menjadi berbeda. Dan analisis tanah tercemar di ketahui bahwa terdiri dari partikel-partikel yang tidak beraturan dan dengan ketebalan yang cukup. Untuk ukuran rongga atau pori juga tidak kelihatan, walaupun sudah diperbesar sampai perbesaran 10.000 kali.

Performa Oksigen Terlarut

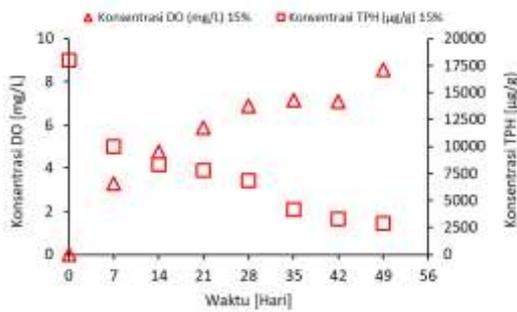
Biodegradasi aerobik adalah jalur paling efektif untuk bioremediasi. Ini berarti bahwa, keberadaan dan konsentrasi oksigen penting dalam proses tersebut. Sehingga keefektifan oksigen terlarut perlu di ukur sampai mencapai kejenuhan (**gambar 3**). Dalam proses arobik, minimal konsentrasi oksigen terlarut dalam limbah minyak bumi adalah sekitar $2,9\ \text{mg/L}$ (Asia dkk, 2009), agar secara efektif bisa mendukung kinerja *activated sludge* dalam merombak total petroleum hidrokarbon dalam tanah tercemar.

**Gambar 3.** Hubungan antara konsentrasi oksigen terlarut terhadap waktu

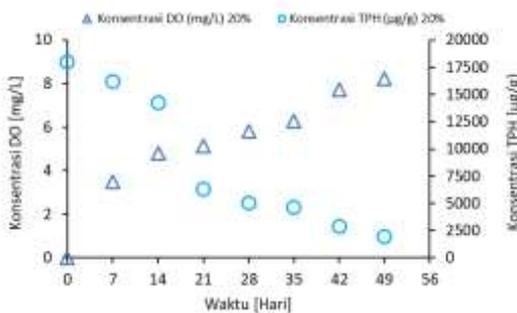
Mikroorganisme pendegradasi minyak bumi umumnya tergolong dalam mikroorganisme aerob, sehingga adanya oksigen sangat penting dalam proses degradasi. Keberadaan oksigen merupakan faktor pembatas laju degradasi hidrokarbon. Mikroorganisme dapat memperoleh oksigen dalam bentuk oksigen bebas yang terdapat di udara dan tanah, serta oksigen yang terlarut dalam air.

Kurangnya aerasi, dalam sistem mungkin menjadi parameter pembatas dalam laju biodegradasi dan katabolisme hidrokarbon oleh bakteri dan jamur (van Hamme dkk, 2003). Monitoring oksigen terlarut, menunjukkan perilaku yang baik (meningkat) setiap menit sampai mengalami kejenuhan pada $8,8\ \text{mg/L}$ (**gambar 3**).

Dalam perlakuan proses aerobik, fungsi utama dari setiap aerator adalah memberikan oksigen untuk mikroorganisme aerobik yang mengkonversi fraksi biodegradabel dari limbah ke dalam senyawa organik atau anorganik sederhana. Efisiensi aerasi tergantung pada kelarutan oksigen dan laju difusi ke dalam kontaminan, masing masing pada kapasitas bioreaktor untuk memenuhi kebutuhan oksigen populasi mikroba (Galaction dkk, 2004).

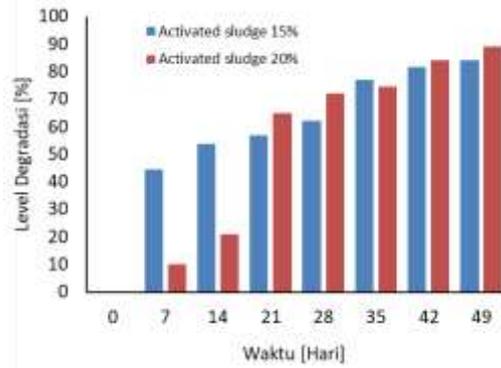


Gambar 4. Pengaruh Konsentrasi Oksigen dan terhadap Reduksi TPH (*activated sludge* 15%(v/v))



Gambar 5. Pengaruh Konsentrasi Oksigen dan terhadap Reduksi TPH (*activated sludge* 20%(v/v))

Degradasi hidrokarbon minyak bumi dalam *slurry bioreactor* di pantau dengan mengukur konsentrasi TPH dalam tanah. Reduksi konsentrasi kontaminan terhadap waktu dilihat pada **gambar 4–5**, menunjukkan konsentrasi TPH pada hari-0 sampai hari-49, mengalami penurunan konsentrasi yang bervariasi. Pada *activated sludge* 15% (**gambar 4**), pada DO 3,31 mg/L dengan interval hari ke-0 sampai ke-7, konsentrasi TPH adalah 18000 µg/g tereduksi menjadi 9990 µg/g, sedangkan pada hari ke-49 konsentrasi TPH tereduksi sangat signifikan yaitu sampai 2800 µg/g di konsentrasi oksigen 8,57 mg/L. Hal ini menunjukkan bahwa, pada konsentrasi *activated sludge* bakteri 15%(v/v) dengan DO_{rata-rata} 6,24 mg/L, baik dan memberikan respon positif terhadap reduksi total petroleum hidrokarbon. Suplay oksigen pada proses remediasi dimaksudkan untuk penambahan penerima elektron. Mikroorganisme membutuhkan oksigen baik dalam bentuk oksigen bebas yang diperoleh dari udara maupun oksigen yang terlarut dalam air. Selain itu, pengaruh oksigen terlarut pada biodegradasi minyak bumi terjadi tidak hanya pada komposisi fisika dan kimia dari minyak, tetapi juga pada laju metabolisme hidrokarbon oleh mikroorganisme, dan komposisi dari komunitas mikroba (Leahy dan Colwell, 1990; Atlas, 1981).



Gambar 6. Grafik hubungan antara level degradasi TPH terhadap waktu

Profil degradasi konsentrasi TPH pada lumpur minyak secara batch, pada konsentrasi *activated sludge* 20%(v/v) (**gambar 5**), menunjukkan bahwa TPH terdegradasi pada setiap minggu sangat baik dari 18000 µg/g menjadi 1970 µg/g di konsentrasi oksigen terlarut 8,21 mg/L. Kondisi ini sangat sesuai, bahwa degradasi hidrokarbon sangat dipengaruhi oleh waktu, dengan rasio kecukupan oksigen yang dibutuhkan oleh mikroorganisme aerobik untuk merombak kontaminan minyak bumi.

Dalam degradasi minyak bumi, oksigen digunakan untuk reaksi oksidasi dan respirasi. Sebagian besar mikroorganisme pendegradasi minyak bumi tergolong dalam mikroorganisme aerob. Pasokan oksigen terlarut yang cukup akan memberikan respon positif ke *activated sludge* secara aerobik sebagai penerima elektron untuk tumbuh secara signifikan. Meskipun dengan jumlah oksigen diberi ke dalam sistem dari sumber pasokan (pompa udara) tidak dikenal, level oksigen terlarut tercatat bahwa oksigen turut hadir sepanjang waktu untuk menjamin kelangsungan hidup *activated sludge* dalam *slurry bioreactor aerobic* dalam degradasi tanah tercemar minyak bumi.

Ketersediaan oksigen sangat penting dalam proses biodegradasi hidrokarbon jenuh dan aromatik. Degradasi hidrokarbon minyak bumi membutuhkan oksigen sebagai akseptor elektron karena dasar proses biodegradasi adalah oksidasi.

Profil tingkat degradasi TPH di tanah tercemar minyak bumi oleh *activated sludge* ditunjukkan dalam gambar 6. Terlihat reduksi TPH yang cepat dengan persen biodegradasi yang meningkat secara signifikan dalam 49 hari periode remediasi. Pada minggu pertama (hari-7) periode remediasi, level degradasi untuk konsentrasi *activated sludge* 15% dan 20%(v/v) adalah 44,50% dan 10,17%. Namun, pada akhir periode remediasi (hari 49), terjadi peningkatan yang sangat signifikan yaitu 84,06% dan 89,05% dengan oksigen terlarut 8,21 mg/L. Hal ini di duga karena adanya reaktifitas *activated sludge* dan suplai oksigen yang cukup, sehingga

kerja *activated sludge* lebih optimal. Disamping itu, biodegradasi TPH tergantung pada kompleksitas struktur kimia, jenis dan posisi grup di substitusi dan tingkat adaptasi enzimatik. Dan *activated sludge* juga memperlihatkan kemampuan dengan meningkatnya level biodegradasinya.

Pencapaian level biodegradasi (**gambar 6**) yang relatif tinggi, hal kemungkinan disebabkan oleh bioavailabilitas TPH yang akan semakin rumit ketika berinteraksi dengan *nonaqueous phase liquid (NAPL)* dan koloid tanah, sehingga mengakibatkan kurang atau sama sekali tidak tersedia bagi mikroorganisme. Konsentrasi kontaminan organik dapat membentuk ikatan kuat dengan tanah atau dapat dimasukkan atau dasingkan di struktur mikropori dari mineral *lattices* atau di daerah hidrofobik terpercil dari matriks organik tanah. Hal ini dapat terjadi pada tingkat yang lebih besar sehingga desorpsi menjadi sangat lambat, dan membatasi fluks dari kontaminan ke fasa air, serta kontaminan menjadi tidak siap secara biologis. Kombinasi dari fenomena di atas mengarah ke distribusi yang berbeda dan partisi dari kontaminan dalam tanah, membuat mereka kurang siap secara biologis, tahan terhadap biodegradasi, dan dengan demikian lebih gigih dalam tanah (Andreoni dan Gianfreda, 2007). Leahy dan Colwell (1990) melaporkan bahwa dengan populasi yang beragam secara keseluruhan, kapasitas enzimatik dibutuhkan untuk degradasi campuran kompleks hidrokarbon, seperti minyak mentah atau bahan bakar diesel. Kultur campuran menampilkan keunggulan metabolisme dari kultur murni (Van Hamme dkk, 2000). Oleh karena itu, kesatuan mikroba yang di dalamnya terdapat berbagai mikroba yang membuat enzim degradatif untuk bahan yang beragam dari jalur dekomposisi dinilai lebih baik untuk degradasi hidrokarbon aromatik. Biodegradasi produk minyak oleh konsorsium mikroba adalah lebih efektif dibandingkan dengan isolat kultur murni karena struktur kimia yang kompleks dari produk minyak. Setiap kali konsorsium dari potensial mikroba yang digunakan untuk degradasi suatu pilihan dari hidrokarbon minyak bumi, secara keseluruhan laju degradasi lebih sukses.

KESIMPULAN

Potensi degradasi tanah tercemar minyak bumi oleh *activated sludge* untuk degradasi *total petroleum hydrocarbons* (TPH) telah dievaluasi. Metode *slurry bioreactor* dapat digunakan untuk proses degradasi *total petroleum hydrocarbons* di tanah yang tercemar minyak bumi. Performa oksigen terlarut memperlihatkan kinerja yang baik dan bervariasi dalam degradasi TPH di tanah tercemar minyak bumi untuk setiap konsentrasi *activated sludge*. Reduksi total petroleum

hidrokarbon (TPH) yang terbaik terjadi pada konsentrasi *activated sludge* 20%(v/v) yaitu sebesar 1970 µg/g pada konsentrasi oksigen terlarut sebesar 8,21 mg/L selama 49 hari periode remediasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Anna Z., Malte H., 1994, “*Effects of Ionic Strength on Bacterial Adhesion and Stability of Flocs in a Wastewater Activated Sludge System*” America Society for biology: USA.
- Andreoni, V., Gianfreda, L., 2007, “Bioremediation and Monitoring of Aromatic-Polluted Habitats”, *Appl Microbiol Biotechnol.*, 76.
- Asia, I.O., Enweani, I.B., and Eguavoen, I.O., 2006, “Characterization and Treatment of Sludge from the Petroleum Industry”, *African Journal of Biotechnology*, 5(5).
- Atlas M.R., 1981, “Microbial Degradation of Petroleum Hydrocarbons: an Environmental Perspective”, *Microbiological Reviews*, 45(1), 180–209.
- Bitton G., 1994, “*Wastewater Microbiology*”, Wiley-Liss Pub: New York.
- Das, K., and Mukherjee, A.K., 2007, “Crude petroleum-oil biodegradation efficiency of *Bacillus subtilis* and *Pseudomonas aeruginosa* strains isolated from a petroleum-oil contaminated soil from NorthEast India”, *Bioresour. Technol.*, 98(7), 1339–1345.
- Das, N., and Chandran, P., 2011, Microbial degradation of petroleum hydrocarbon contaminants: An overview, *Biotechnol. Res. Int.*, 2011, 941810.
- Desrina R., 2011, “Perbandingan biaya pada teknik-teknik remediasi tanah tercemar minyak bumi”, *Lembaran Publikasi Minyak dan Gas Bumi*, 45(3), 183–194.
- Galaction, A.-I., Cascaval, D., Oniscu, C., Turnea, M., 2004, “Prediction of Oxygen Mass Transfer Coefficients in Stirred Bioreactors for Bacteria, Yeasts and Fungus broths”, *Biochemical Engineering Journal*, 20, 85–94.
- Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No. 128 Tahun 2003, *Tata Cara Persyaratan Teknis Pengolahan Limbah Minyak Bumi dan Tanah Terkontaminasi oleh Minyak Bumi secara Biologis*.
- Leahy, J.G., Colwell, R.R., 1990, “Microbial degradation of hydrocarbons in the environment”, *Microbiological Reviews*, 54(3), 305–315.
- Lifrieri, J., 2014, “Explanation of the EPH Test for Petroleum Wastes”.
- Liu, P.-W.G., Chang, T.C., Whang, L.-M., Kao, C.-H., Pan, P.-T., Cheng, S.-S., 2011, “Bioremediation of Petroleum Hydrocarbon Contaminated Soil: Effects of Strategies and

- Microbial Community Shift”, *Int. Biodeterior. Biodegrad.*, 65, 1119–1127.
- Machin-Ramírez, C., Okoh, A.I., Morales, D., Mayolo-Deloisa, K., Quintero, R., and TrejoHernández, M.R., 2008, “Slurry-phase biodegradation of weathered oily sludge waste”, *Chemosphere*, 70(4), 737–744.
- Milic, J.S., Beškoski, V.P., Ilić, M.V., Ali, S.A.M., Gojgić-Cvijović, G.D., and Vrvic, M.M., 2009, “Bioremediation of soil heavily contaminated with crude oil and its products: Composition of the microbial consortium”, *J. Serb. Chem. Soc.*, 74(4), 455–460.
- Tuhuloula, A., 2011, “Bioremediasi Lahan Terkontaminasi Minyak Bumi Dengan Menggunakan Bakteri *Bacillus cereus* Pada Slurry Bioreactor”, Thesis, Jurusan Teknik Kimia, ITS Surabaya.
- Tuhuloula, A., Suprpto, S., Altway, A., Juliastuti, S.R., 2019, “Biodegradation of Extractable Petroleum Hydrocarbons by Consortia *Bacillus cereus* and *Pseudomonas putida* in Petroleum Contaminated-Soil”, *Indones. J. Chem.*, 19(2), 347 – 355
- Van Hamme, J.D., Singh, A., Ward, O.P., 2003, “Recent Advances in Petroleum Microbiology”, *Microbiol. Mol. Biol. Rev.*, 67(4), 503–549.
- Widarsono, B., (2013), “Cadangan dan Produksi Gas Bumi Nasional: Sebuah Analisis atas Potensi dan Tantangannya”, *Lembaran Publ. Minyak dan Gas Bumi*, 47(3), 115–126.
- Wolfgang, F., and Martin, H., 2000, “Aerobic Degradation by Microorganisms” in *Environmental Processes-Soil Decontamination*, Klein, J., Ed., Wiley-VCH, Weinheim, Germany, 146–155.
- Yudono, B., Said, M., Hakstege, P., Suryadi, F.X., 2009, “Kinetics of Indigenous Isolate Bacteria *Bacillus mycoides* used for Ex-situ Bioremediation of Petroleum Contaminated Soil in PT Pertamina Sungai Lilin South Sumatera”, *J. Sustain. Dev.*, 2.