

# Bioremediasi Limbah Minyak Bumi dengan Teknik Biopile di Lapangan Klamono Papua

## *Bioremediation of Petroleum Waste with Biopile Techniques in Klamono Area Papua*

Munawar,<sup>1,\*</sup> Zaidan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Biologi Fakultas MIPA UNSRI, Jl. Palembang-Prabumulih KM 32, Indralaya, 30662, Indonesia

<sup>2</sup>Jurusan Agronomi Fakultas Pertanian UNSRI, Jl. Palembang-Prabumulih KM 32, Indralaya, 30662, Indonesia

### ABSTRAK

Telah dilakukan penelitian tentang bioremediasi limbah minyak bumi oleh bakteri petrofilik lokal dengan teknik biopile di lapangan Klamono Papua. Limbah minyak yang digunakan berasal dari berbagai sumber yaitu kegiatan pembersihan tangki (*tank cleaning*), tumpahan minyak (*oil spill*), perangkap minyak (*oil catcher*), kebocoran pipa, dan limbah kegiatan pengeboran yang mengandung residu minyak. Preparasi limbah minyak dilakukan dengan cara menambahkan serbuk gergajian kayu sebagai *bulking agent* sebanyak 10% (b/b), rasio C:N:P:K = 100:5:1;0,1 dan inokulum campur bakteri petrofilik lokal hasil isolasi dari sumber-sumber limbah tersebut yang telah dikumpulkan dalam kolam penyimpanan yaitu *Pseudomonas* sp. (PSP01), *Pseudomonas* sp. (PSP05), dan *Bacillus* sp. (PSP03) dengan ratio 1:1:1 sebanyak 0,5% (v/b). Selama proses bioremediasi dilakukan aerasi dengan laju 1 liter/jam/m<sup>3</sup>. Proses monitoring dilakukan setiap minggu dengan melakukan sampling secara *multiple sampling* dengan menentukan lima stasiun dan setiap stasiun ditentukan tiga titik sampling, yaitu bagian permukaan, tengah dan bawah berdasarkan kedalaman, sampel yang diperoleh dikomposit dan dianalisis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa terjadi penurunan *Total Petroleum Hydrocarbon* (TPH) sebesar 91,04% selama enam minggu. Populasi bakteri total selama proses bioremediasi berkisar 10<sup>3</sup> hingga 10<sup>8</sup> CFU/gram tanah. Selain itu pada akhir pengamatan menunjukkan bahwa senyawa aromatik toksik, yaitu *Benzene*, *Toluene*, *Ethylbenzene* dan *Xylene* (BTEX) sudah menunjukkan konsentrasi di bawah Baku Mutu Lingkungan yang berlaku. Dengan demikian, bakteri petrofilik lokal efektif sebagai agen biologis pada proses bioremediasi limbah minyak bumi dengan metode *biopile*.

**Kata kunci:** bakteri petrofilik lokal; bioremediasi; biopile; limbah minyak bumi; lapangan Klamono

### ABSTRACT

Research of bioremediation of petroleum waste by indigenous petrophilic bacteria with biopile techniques at Klamono Area in Papua has been done. Petroleum waste was derived from various sources, namely tank cleaning, oil spills, oil catcher, leaking pipes, and drilling wastes containing oil residue. Preparation of petroleum waste has been done by adding wood sawdust as a bulking agent as much as 10% (w/w), the ratio of C: N: P: K = 100:5:1; 0.1 and mixed cultures of indigenous petrophilic bacterial isolated from the sources of the waste that has been collected in a storage-pit that *Pseudomonas* sp. (PSP01), *Pseudomonas* sp. (PSP05), and *Bacillus* sp. (PSP03) with 1:1:1 ratio of 0.5% (v/w). During the bioremediation process was aerated at a rate of 1 liter/jam/m<sup>3</sup>. Monitoring process have been done every week by doing the sampling with multiple sampling method to determine the five stations and each station has determined three sampling points, namely the surface, middle and bottom based on the depth, samples have been obtained pooled and analyzed.

\* Alamat Korespondensi:

e-mail: munawar@unsri.ac.id

The results showed that a decline in Total Petroleum Hydrocarbon (TPH) of 91.04% for six weeks. Total bacterial populations during bioremediation processes ranging  $10^3$  to  $10^8$  CFU/gram of soil. In addition at the end of the observation showed that the toxic aromatic compounds benzene, toluene, ethylbenzene, and xylene (BTEX) showed concentrations under the Environmental Quality Standards. Thus, indigenous petrophilic bacteria effective as biological agents in the bioremediation of petroleum waste by biopile method.

**Key words:** indigenous petrophilic bacteria; bioremediation; biopile; petroleum waste; Klamono area

## PENDAHULUAN

Salah satu jenis limbah yang dihasilkan dari kegiatan eksplorasi dan produksi minyak bumi adalah limbah *sludge* yang berbentuk semi padat hingga padat. Limbah tersebut dapat berasal dari sisa pembersihan tangki penampungan, kebocoran pipa, tumpahan atau ceceran minyak mentah selama proses eksplorasi, produksi, dan transportasi. Umumnya limbah *sludge* ditampung di kolam-kolam yang dibuat di areal eksplorasi, ataupun sudah diakumulasikan dalam satu kolam khusus untuk penampungan (Ueno *et al.*, 2007).

Limbah *sludge* yang telah tertampung masih harus diolah supaya limbah tersebut dapat memenuhi nilai Baku Mutu Lingkungan (BML), sehingga bisa dimanfaatkan kembali atau dibuang ke lingkungan. Pembuangan limbah *sludge* minyak bumi ke lingkungan secara langsung tanpa melalui pengelolaan terlebih dahulu akan menimbulkan dampak negatif bagi lingkungan yang terkontaminasi limbah tersebut. Akibat yang ditimbulkan dalam jangka panjang terhadap lingkungan terestrial maupun akuatik penerima adalah akan menurunkan kualitas lingkungan sehingga biota yang menempati lingkungan tersebut terganggu (Anonim, 1999). Di samping itu, penurunan kualitas lingkungan akibat terkontaminasi limbah *sludge* minyak bumi dapat mengurangi fungsi baik untuk keseimbangan ekologis maupun fungsi lingkungan bagi manusia itu sendiri.

Bioremediasi merupakan salah satu teknologi yang sering digunakan untuk mengolah limbah atau memulihkan suatu lingkungan yang terkontaminasi limbah sehingga sesuai kondisi semula atau sesuai baku mutu lingkungan yang berlaku. Beberapa tipe bioremediasi untuk mengolah limbah *sludge* minyak bumi antara lain *biopile*, tipe ini dilakukan dengan mengalirkan udara untuk aerasi melalui pipa. Salah satu kelebihan dari tipe ini dapat dilakukan proses aerasi sesuai dengan kebutuhan mikroba aerob sebagai agen biologis yang digunakan dan dengan tumpukan limbah yang cukup tinggi selama masih bisa dilakukan distribusi pipa untuk aerasi (Diplock *et al.*, 2010).

Agen biologis yang digunakan pada proses bioremediasi salah satunya adalah bakteri petrofilik lokal yang biasanya hasil isolasi dari lokasi limbah *sludge* minyak akan diolah. Kelebihan bakteri lokal adalah sudah teradaptasi dengan kondisi lingkungan dan karakteristik limbah *sludge* minyak yang akan diolah, sehingga potensi kinerja biodegradasinya lebih efektif, jika dibandingkan dengan agen biologis komersial yang belum sesuai dengan lingkungan dan

karakteristik limbah yang akan diolah (Thouand *et al.*, 1999; Zhu *et al.*, 2004). Bakteri petrofilik yang diisolasi dari limbah *sludge* minyak bumi ataupun dari areal terkontaminasi minyak bumi umumnya merupakan bakteri tanah yang didominasi oleh genus *Pseudomonas* (Munawar *et al.*, 2012).

Beberapa penelitian bioremediasi tanah terkontaminasi hidrokarbon minyak bumi yang telah dilakukan untuk menurunkan Total Petroleum Hydrocarbon (TPH) hingga memenuhi baku mutu lingkungan membutuhkan waktu yang sangat bervariasi. Santosa *et al.*, (2004) melakukan bioremediasi dengan TPH awal 11,7% turun hingga 0,9% membutuhkan waktu sekitar 3,33 bulan, sedangkan Effendi (2006) melakukan bioremediasi dengan TPH awal 3,3% turun hingga 0,9% membutuhkan waktu sekitar 15 bulan.

Tujuan penelitian ini adalah untuk mendeskripsikan kemampuan bakteri petrofilik lokal sebagai agen biologis pada bioremediasi limbah minyak bumi secara *biopile* di lapangan Klamono, Kabupaten Sorong, Provinsi Papua Barat. Lapangan Klamono merupakan salah satu lokasi perusahaan eksplorasi dan produksi minyak bumi di Provinsi Papua Barat. Sebagai hasil samping dari usaha eksplorasi dan produksi minyak bumi adalah dihasilkannya limbah *sludge* minyak. Diharapkan hasil penelitian ini mampu melakukan bioremediasi limbah minyak bumi hingga memenuhi Baku Mutu Lingkungan dalam waktu yang lebih singkat dari yang ditentukan oleh peraturan yang berlaku.

## METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan bulan Oktober-Desember 2010. Proses bioremediasi dilakukan di lapangan Klamono, kabupaten Sorong, Propinsi Papua Barat pada koordinat  $131^{\circ} 29' 47,1''$  BT dan  $01^{\circ} 07' 25,6''$  LS. Analisis Total Petroleum Hydrocarbon (TPH) dilakukan di laboratorium Kimia Jurusan Kimia FMIPA Universitas Sriwijaya, analisis populasi bakteri dilakukan di laboratorium Mikrobiologi Jurusan Biologi FMIPA Universitas Sriwijaya. Analisis senyawa hidrokarbon menggunakan Gas Chromatography-Mass Spectrometri (GC-MS) di laboratorium Instrumen Jurusan Kimia FPMIPA Universitas Pendidikan Indonesia.

Limbah *sludge* minyak yang akan diolah sekitar  $280 \text{ m}^3$ . Preparasi limbah dilakukan dengan menambahkan serbuk gergajian kayu sebanyak 10% (b/b) sebagai *bulking agent*. Selanjutnya dilakukan analisis kandungan TPH awal secara gravimetri (Mishra *et al.*, 2001). Penghitungan C dilakukan dengan

cara mengalihkan konsentrasi TPH dengan faktor konversi C yaitu sebesar 0,78 (Rossiana, 2004). Rasio C:N:P:K diatur hingga 100:5:1:0,1 dengan menambahkan sumber N dari urea, sumber P dari pupuk TSP, dan sumber K dari pupuk KCl (Anonymous, 2003). Kelembapan awal diatur hingga sekitar 70% (Hwang *et al.*, 2006).

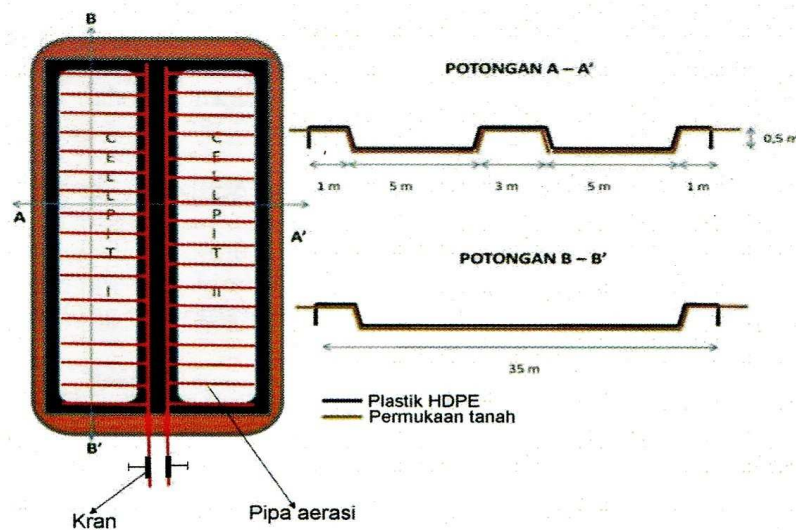
Preparasi inokulum bakteri petrofilik lokal. Inokulum campur bakteri petrofilik lokal merupakan hasil isolasi dari limbah *sludge* dan area yang terkontaminasi limbah minyak di Klamono dan telah diseleksi serta diidentifikasi berdasarkan ciri morfologi dan biokimia hingga pada tingkat genera di laboratorium Mikrobiologi Jurusan Biologi Fakultas MIPA Universitas Sriwijaya. Tiga isolat bakteri petrofilik lokal yang terseleksi dan dioptimasi yaitu, *Pseudomonas* sp. (PSP01), *Pseudomonas* sp. (PSP05), dan *Bacillus* sp. (PSP03). Inokulum campur bakteri petrofilik lokal terdiri atas tiga isolat bakteri tersebut dengan rasio 1:1:1. Pembuatan inokulum campur didasarkan atas waktu generasi (g) terpendek setiap isolat bakteri sebagaimana yang dilakukan oleh (Munawar & Elfita, 2012). Adapun waktu generasi terpendek setiap isolat bakteri yang digunakan berturut-turut adalah *Pseudomonas* sp. (PSP01) 4,07 jam, *Pseudomonas* sp. (PSP05) 4,30 jam, dan *Bacillus* sp. (PSP03) 4,64 jam.

Preparasi *Mixing Cell* untuk proses bioremediasi. *Mixing Cell* merupakan wahana yang digunakan sebagai tempat berlangsungnya proses bioremediasi limbah. *Mixing cell* dibuat sebanyak dua buah, satu *mixing cell* diinokulasi bakteri dan satunya tidak diinokulasi bakteri (kontrol). Dimensi masing-masing *mixing cell* 35 m (Panjang) × 5 m (Lebar) × 1 m (Tinggi), sehingga kapasitas masing-masing mampu menampung limbah sekitar 175 m<sup>3</sup>. Semua *mixing cell* dilapisi plastik *High Density Poly Ethylene* (HDPE) setebal 1 mm (KepMen LH, 2003) dan dipasang pipa aerasi dengan jarak antarpipa 1 m dan setiap pipa diberi lubang setiap 1 m, sehingga setiap 1 m<sup>3</sup> terdapat 1 lubang aerasi (Gambar 1.).

Monitoring selama proses bioremediasi. Awal monitoring dilakukan dengan sampling awal (T<sub>0</sub>), selanjutnya dilakukan inokulasi bakteri petrofilik lokal sebanyak 0,5% (v/b) ke dalam limbah yang akan diolah. Monitoring dilakukan dengan mengambil sampel secara berkala setiap minggu hingga konsentrasi TPH mencapai kurang dari 1%. Metode sampling yang digunakan *multiple sampling* dengan menentukan lima stasiun dan masing-masing stasiun ditentukan tiga titik sampling yaitu bagian permukaan, tengah dan bawah berdasarkan kedalaman. Setiap titik sampling diambil sampel limbah sebanyak 0,5–1 kg menggunakan *auger*, sampel yang diperoleh dikomposit dan dianalisis parameter yang menunjukkan proses bioremediasi.

Parameter yang dianalisis dari setiap sampel ialah konsentrasi TPH, pH, kelembapan, dan Total bakteri petrofilik dengan metode *Total Viabel Count* (TVC). Nilai hasil pengukuran parameter pada *mixing cell* yang diinokulasi bakteri dilakukan koreksi dengan nilai hasil pengukuran *mixing cell* yang tidak diinokulasi bakteri (kontrol). Sampel awal yaitu sampel yang diambil sebelum diinokulasi bakteri petrofilik lokal (T<sub>0</sub>) dan sampel akhir yang menunjukkan konsentrasi TPH mencapai kurang dari 1% (T<sub>n</sub>) dilakukan analisis konsentrasi senyawa hidrokarbon aromatik yang bersifat toksik, yaitu *Benzene*, *Toluene*, *Ethylbenzene*, dan *Xylene* (BTEX) menggunakan *Gas Chromatography-Mass Spectrometri* (GC-MS).

Pengukuran TPH dengan gravimetri. Sebanyak 1,5 g limbah minyak diekstraksi dengan menggunakan 15 ml n-heksan. Campuran dikocok hingga homogen (warna pelarut tidak bertambah coklat), dan selanjutnya disentrifugasi dengan kecepatan 3500 rpm selama lima menit. Supernatan berupa pelarut yang telah mengandung TPH dipindahkan ke dalam botol. Dengan cara yang sama sisa tanah yang telah diekstraksi dengan n-heksan diekstraksi ulang berturut-turut menggunakan metilen klorida dan kloroform. Selanjutnya TPH hasil



Gambar 1. Penampang *mixing cell* dari samping (kanan) dan skema pemasangan pipa aerasi (kiri)

ekstraksi dari tiga pelarut tersebut digabungkan dalam satu botol yang telah diketahui beratnya dan diuapkan seperti pada cara ekstraksi dari sampel cair. Konsentrasi TPH dihitung dengan persamaan 1.

$$TPH (\%) = \frac{w1-w0}{ws} \times 100 \dots\dots\dots (1)$$

Keterangan: W1 = berat botol berisi TPH (gram), W0 = berat botol kosong (gram), WS: volume sampel (ml) jika sampel cair atau berat sampel (gram) jika sampel padat. Untuk mengkonversi TPH dalam satuan % menjadi dalam satuan mg/liter atau mg/kg atau *part per milion* (ppm), maka dikalikan 10.000 (sepuluh ribu) (Mishra *et al.*, 2001).

Pengukuran pH dan kelembapan. Nilai pH dan kelembapan dilakukan pengukuran langsung pada limbah yang sedang dilakukan bioremediasi dalam *mixing cell* menggunakan *soil tester*.

Penghitungan total bakteri petrofilik dengan metode Total Viabel Count. Sebanyak 5 g limbah minyak dimasukkan ke dalam erlenmeyer 100 ml yang berisi larutan garam fisiologis 45 ml, selanjutnya diencerkan hingga 10<sup>-7</sup>. Sebanyak 0,1 ml dari sampel pengenceran 10<sup>-4</sup> hingga 10<sup>-7</sup> dimasukkan ke dalam cawan petri steril yang telah berisi 10 ml *Mineral Medium* Agar lempeng yang mengandung minyak bumi sebanyak 1% (v/v). Komposisi *Mineral Medium* (gram/liter) MgSO<sub>4</sub> 7H<sub>2</sub>O 2,0; NaCl 1,0; FeCl<sub>3</sub> 0,2; CaCl<sub>2</sub> 1,0; K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> 0,04; (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,09; Bacto Agar 15 (modifikasi: Atlas, 2005). Penambahan minyak dilakukan langsung ke dalam *Mineral Medium* sebelum disteril menggunakan autoklaf. Selanjutnya diratakan menggunakan batang gelas berbentuk L secara aseptik. Semua cawan petri diinkubasi pada suhu ruang selama 2 × 24 jam, selanjutnya koloni yang tumbuh dihitung dan dinyatakan dalam bentuk *colony forming unit* (CFU) per gram *sludge* (Foght & Aislabie, 2005).

Pengukuran senyawa BTEX menggunakan GC-MS. Alat GC-MS yang digunakan adalah Shimadzu QP 2010

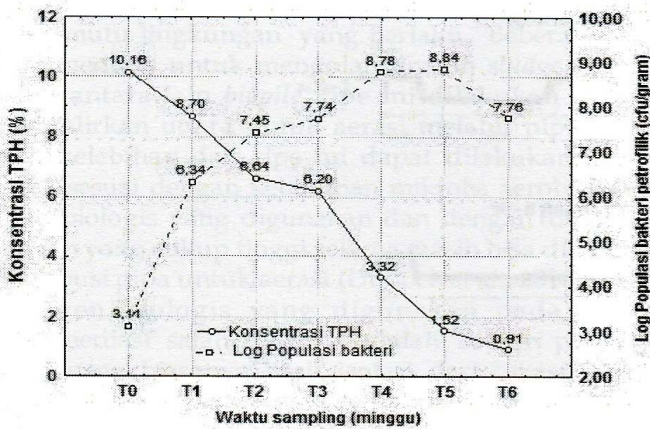
ULTRA, kolom yang digunakan BD5. Analisis dilakukan dengan kondisi suhu kolom 60°C, suhu detektor 300°C, suhu injektor 270°C, suhu diprogram pada awal 60°C selanjutnya dinaikkan 15°C/menit sampai mencapai suhu 510°C. Waktu analisis selama 30 menit, tekanan 80,2 kpa, laju alir 1,32 mL/menit, split ratio 200, *liniar velocity* 41,7 mL/menit. Sampel berupa TPH yang dilarutkan dalam n-Heksan diinjeksikan sebanyak 0,2 µL, masing-masing senyawa *Benzene*, *Toluene*, *Ethylbenzene* dan *Xylene* masing-masing diinjeksikan sebagai standar eksternal.

HASIL DAN PEMBAHASAN

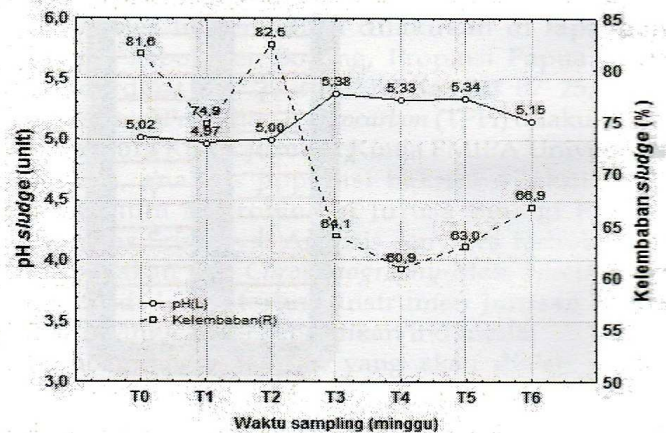
Berdasarkan hasil monitoring yang dilakukan mulai dari sampling T0 hingga T6 konsentrasi TPH limbah pada *mixing cell* yang diinokulasi bakteri setelah dikoreksi kontrol mengalami penurunan dan pada sampling minggu keenam (T6) konsentrasi TPH sudah di bawah 1% (Gambar 2). Kondisi ini dicapai dalam waktu sekitar satu setengah bulan. Hal ini menunjukkan bahwa karakteristik limbah *sludge* setelah proses bioremediasi sudah sesuai dengan Baku Mutu Lingkungan (BML) pada Kep Men LH Nomor 128 Tahun 2003, tentang "Tata cara dan persyaratan teknis pengolahan limbah minyak bumi dan tanah terkontaminasi oleh minyak bumi secara biologis".

Di Indonesia proses bioremediasi limbah minyak bumi atau lingkungan yang terkontaminasi minyak bumi diperbolehkan jika kandungan TPH maksimum 15% dan dinyatakan selesai jika konsentrasi TPH menurun hingga < 1% dalam waktu maksimum 8 bulan (KepMen LH, 2003). Berdasarkan acuan tersebut maka proses bioremediasi limbah *sludge* minyak bumi dengan agen biologis bakteri petrofilik lokal dan metode *biopile* sangat efektif karena dari konsentrasi TPH awal 10,16% menurun hingga konsentrasi 0,91% dalam waktu hanya 1,5 bulan.

Penurunan TPH diikuti oleh peningkatan populasi bakteri petrofilik hingga minggu ke lima (T5), tetapi



Gambar 2. Konsentrasi TPH dan populasi bakteri petrofilik selama proses bioremediasi



Gambar 3. Nilai pH dan kelembapan selama proses bioremediasi

pada minggu ke enam (T6) populasi bakteri petrofilik mengalami penurunan (Gambar 2). Peningkatan populasi bakteri petrofilik yang paling tinggi ditunjukkan dari minggu ke-0 (T0) ke minggu ke-1 (T1). Hal ini disebabkan pada T0 belum ditambahkan inokulum, sehingga bakteri yang ada merupakan bakteri yang secara alami sudah terdapat pada limbah yang jumlahnya sekitar  $10^3$  cfu/gram. Setelah dilakukan sampling pada T0 segera ditambahkan

inokulum bakteri petrofilik sehingga populasinya meningkat pada saat sampling (T1). Hasil ini dapat dijelaskan bahwa berkurangnya TPH karena didegradasi oleh bakteri petrofilik. Hasil degradasi TPH oleh bakteri petrofilik secara aerob menghasilkan  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , energi, dan biomassa dalam bentuk sel bakteri (Atlas & Cerniglia, 1995).

Parameter pendukung, yaitu nilai pH selama proses bioremediasi tidak terlalu mengalami perubahan dengan kisaran 4,97 hingga 5,38. Nilai pH selama proses bioremediasi berada di bawah nilai pH proses bioremediasi pada umumnya. Nilai pH secara umum tergolong asam, karena limbah yang diolah bercampur dengan tanah dari lingkungan yang secara alamiah sudah bersifat asam. Namun bakteri petrofilik yang digunakan berasal dari limbah tersebut diduga bersifat asidofilik, sehingga mampu melakukan aktivitasnya pada pH asam.

Sedangkan nilai kelembapan bersifat fluktuatif berkisar antara 60,9–82,5% (Gambar 3.). Nilai tersebut sangat dipengaruhi oleh kondisi musim pada saat proses bioremediasi berlangsung. Pada awal proses bioremediasi hingga minggu ke dua (T2) curah hujan cukup tinggi ( $\pm 300$  mm/bulan), sedangkan minggu ke tiga (T3) hingga minggu keenam (T6) curah hujan rendah ( $\pm 100$  mm/bulan). Nilai kelembapan mulai minggu ke tiga (T3) hingga minggu ke enam (T6) berada pada nilai kisaran yang terjadi pada bioremediasi secara umum. Kisaran pH dan kelembapan pada proses bioremediasi secara umum masing-masing adalah 6–8 unit dan 50–70% (Anonim, 2003).

Nilai parameter lain berupa konsentrasi senyawa hidrokarbon aromatik yang bersifat toksik (BTEX) pada akhir proses bioremediasi sudah berada di bawah batas ambang yang diperbolehkan oleh Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup No. 128 Tahun 2003 (Tabel 1).

Namun demikian material limbah pascaproses bioremediasi tidak boleh digunakan untuk menanam tanaman konsumtif sehingga masih perlu dilakukan pemantauan pascaproses bioremediasi. Limbah minyak bumi biasanya juga mengandung beberapa logam berat

yang hanya diakumulasi oleh bakteri pendegradasi hidrokarbon, sehingga material limbah setelah diolah masih memungkinkan mengandung logam berat. Jika ditanami tanaman konsumsi dikuatirkan logam berat akan diabsorpsi oleh tanaman sehingga dapat berbahaya jika dikonsumsi.

## SIMPULAN

Bakteri petrofilik lokal mampu menurunkan TPH sebesar 91,04% selama enam minggu. Bakteri petrofilik lokal efektif sebagai agen biologis pada proses bioremediasi limbah minyak bumi dengan metode *biopile*.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT Pertamina EP Field Papua dan Pusat Penelitian Lingkungan Hidup Universitas Sriwijaya yang telah mendukung sepenuhnya kegiatan penelitian ini hingga dapat ditulis dan dipublikasikan artikel ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- Anonim, 1999. *Monitored natural attenuation of petroleum hydrocarbons*. Washington: US EPA.
- Anonim, 2003. *Aerobic Biodegradation of Oily Waste. A Field Guidance Book for Federal On-scene Coordinators*. Version 1<sup>th</sup>. U.S. Environmental Protection Agency.
- Atlas RM, & Cerniglia CE, 1995. *Bioremediation of Petroleum Pollutants: Diversity and environmental aspects of hydrocarbon biodegradation*. *Bioscience*. **45**: 332–338.
- Atlas RM, 2005. *Handbook of media for environmental microbiology*. 2<sup>nd</sup> ed. New York. : Taylor & Francis Group.
- Diplock EE, Mardlin DP, Killham KS & Paton GI, 2010. *The Role of Decision Support for Bioremediation Strategies, Exemplified by Hydrocarbons for In Site and Ex Situ Procedures*. pp 201–217 in Cummings SP (ed) *Bioremediation Methods and Protocols*. New York: Humana Press.
- Effendi AJ, 2006. *Treatability Test of Oil-Contaminated Soil Using Bio-Augmented Bacteria*. *Jurnal Infrastructure and Built Environment*. **2(2)**: 41–47.
- Foght J, & Aislabie J, 2005. *Enumeration of Soil Microorganism*. pp 261–280 in Margesin R & Schinner F (Eds) *Manual for Soil Analysis: Monitoring and Assessing Soil Bioremediation*. Heidelberg: Springer Science.
- Hwang EY, Park JS, Kim JD, & Namkoong W, 2006. *Effects of Aeration Mode on the Composting of Diesel-Contaminated Soil*. *J.Ind.Eng.Chem*. **12**: 694–701.
- Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup No. 28, 2003. *Tentang Tata Cara dan Persyaratan Teknis Pengolahan Limbah Minyak Bumi dan Tanah Terkontaminasi oleh Minyak Bumi Secara Biologis*. Jakarta.

**Tabel 1.** Konsentrasi BTEX sebelum dan sesudah proses bioremediasi

Parameter	Satuan	Sebelum	Sesudah	BML	Penurunan (%)
Benzene	$\mu\text{g/g}$	4,25	0,52	1	87,76
Toluene	$\mu\text{g/g}$	18,78	3,30	10	82,43
Ethylbenzene	$\mu\text{g/g}$	20,69	3,32	10	83,95
Xylene	$\mu\text{g/g}$	15,12	2,36	10	84,39

- Mishra S, Jyot J, Kuuad RC, & Lai B, 2001. Evaluation of inoculum addition to stimulate in situ bioremediation of oily-sludge-contaminated soil. *Appl. Environ. Microbiol.* 64: 1675–1681.
- Munawar dan Elfitra, 2012. Ketahanan Hidup Konsorsium Bakteri Petrofilik Pada Media Pembawa Tanah Gambut Selama Masa Penyimpanan. *Makalah*. Disampaikan pada Seminar Nasional Hasil Penelitian Tahun 2011, Palembang: 1–2 Desember 2012.
- Munawar, Aditiawati P, & Astuti DI, 2012. Sequential Isolation of Saturated, Aromatic, Resinic And Asphaltic Fractions Degrading Bacteria From Oil Contaminated Soil In South Sumatra. *Makara Journal of Science.* 16(1): 58–64.
- Rossiana N, 2004. Bioremediasi lumpur minyak bumi dengan mikroorganisme dan zeolit serta pengujiannya dengan tanaman sengon (*Paraserianthes falcataria* L. Nelsen). Disertasi. Bandung: Program Pascasarjana Universitas Padjadjaran.
- Santosa DA, Listyawati, Irawathi T, Herdiyantoro D, Ananda RWU, & Adiwibowo S, 2004. *Biotechnology for remediation of oil sludge and petroleum contaminated ecosystem using bacteria isolation from Indonesia's region*. Bogor: Environmental Research Center Institut Pertanian Bogor.
- Thouand G, Bauda P, Oudot J, Kirsch G, Sutton C, & Vidalie JF, 1999. Laboratory evaluation of crude oil biodegradation with commercial or natural microbial inocula. *Can. J. Microbiol.* 45: 106–115.
- Ueno A, Ito Y, Isao Y, & Okuyama H, 2007. Isolation and characterization of bacteria from soil contaminated with diesel oil and the possible use of these in autochthonous bioaugmentation. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*; 23: 1739–1745.
- Zhu X, Venosa AD & Suidan MT, 2004. Literature review on the use of commercial bioremediation agents for cleanup of oil-contaminated estuarine environments. Cincinnati: Environmental Protection Agency.