

Ujicoba Konsorsium Mikroba dalam Upaya Bioremediasi Tanah Tercemar Minyak dengan Menggunakan Teknik Landfarming Skala Bangku

The Effectiveness of Microbial Consortia for Bioremediation of Oil-Contaminated Soil Using Bench-Scale Landfarming Technology

JOKO PRAYITNO

Pusat Teknologi Lingkungan, Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi
Gedung 820 Teknologi Kebumihan Kawasan Puspiptek Tangerang Selatan
joko.prayitno@bppt.go.id

ABSTRACT

The effect of bacterial augmentation, their doses and their effectiveness to reduce oil contamination in the absence or presence of organic matter in soil was investigated in two separate bench scale landfarming experiments using oil-contaminated soil from Bojonegoro. Two bacterial consortia (K1, a mix of strain 3.3, 3.4 dan 6.9; and K2, a mix of strain P1 and P2), were used and three level of bacterial dose (10^6 , 10^9 , and 10^{12} cfu/g soil) were tested. Initial concentration of crude oil in the soil was 5.8% and 4.6%. Urea and NPK fertilizers were amended to the soil before bacterial application. Results showed that soil temperature was increased to 40°C and soil pH slightly dropped from 8.1 to 7.6 during the first week of the experiment. In the first experiment (without organic matter ammendment), TPH of all treatments were decreased from 5.8% to 2.8-3.2% after 12 weeks. Statistical analysis showed that the bacterial consortium applications and their doses had no significant effects on the reduction of both TPH and bacterial population in the soil. In contrast, in the second experiment (with organic matter ammendment), both bacterial consortia could reduce TPH under 1% after 5 weeks of experiments. This experiments suggested that bacterial consortia developed in the laboratory could face several environmental constrains to survive in the soil for long period.

Key words: bioremediation, microbial consortium, oil-contaminated soil, TPH

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan mempelajari pengaruh dari pemberian konsorsium bakteri, dosis bakteri dan bahan organik yang diberikan ke dalam tanah tercemar minyak asal Bojonegoro menggunakan teknik landfarming skala bangku. Percobaan ini terdiri dari dua bagian, yaitu penambahan mikroba tanpa atau dengan penambahan bahan organik. Konsorsium bakteri yang dicoba adalah K1 (campuran strain 3.3, 3.4 dan 6.9) dan K2 (campuran strain P2 dan P6). Dosis konsorsium bakteri yang diuji adalah 10^6 , 10^9 dan 10^{12} cfu/g tanah. Kadar minyak awal dalam tanah adalah 5,8% dan 4,6%. Sebelum diinokulasi, tanah ditambahkan pupuk Urea dan NPK. Hasil percobaan 1 menunjukkan bahwa terjadi peningkatan suhu tanah hingga 40°C dan penurunan pH dari 8.1 menjadi 7.6 pada minggu pertama percobaan. Nilai TPH masing-masing perlakuan turun dari 5,8% menjadi 2.8-3.2% setelah 12 minggu. Analisis statistik menyatakan bahwa pemberian konsorsium, dan dosis konsorsium bakteri tidak berpengaruh nyata terhadap penurunan nilai TPH maupun terhadap populasi mikroba tanah. Pada percobaan 2 (dengan penambahan bahan organik), kedua konsorsium bakteri dapat menurunkan TPH di bawah 1% setelah 5 minggu percobaan. Berdasarkan hasil percobaan ini, konsorsium bakteri yang dikembangkan di lab diduga mengalami kendala lingkungan yang menyebabkan tidak dapat hidup lama di tanah.

Kata kunci: bioremediasi, konsorsium mikroba, tanah tercemar minyak, TPH

1. PENDAHULUAN

Tanah yang tercemar minyak bumi banyak ditemukan di sekitar sumur minyak dan lokasi pengumpulan minyak. Pencemaran tersebut

terjadi akibat tumpahan minyak sewaktu penambangan dan pemindahan minyak bumi. Pencemaran tanah oleh minyak bumi menimbulkan masalah lingkungan karena minyak

bumi mengandung berbagai macam senyawa hidrokarbon yang bersifat toksik bagi manusia dan organisme lainnya^(1,2).

Secara alami, mikroba tanah mampu mendegradasi senyawa-senyawa hidrokarbon yang mencemari tanah⁽³⁾. Senyawa hidrokarbon rantai pendek adalah yang paling cepat didegradasi oleh mikroba tanah. Sedangkan senyawa hidrokarbon yang lebih kompleks seperti senyawa aromatik membutuhkan waktu lebih lama untuk didegradasi^(4,5,6). Jenis mikroba tertentu hanya dapat mendegradasi senyawa hidrokarbon tertentu saja, sehingga dalam kondisi alami berbagai jenis mikroba bekerjasama (konsorsium) untuk mendegradasi cemaran minyak bumi di tanah⁽⁴⁾.

Proses degradasi minyak di tanah secara alami membutuhkan waktu yang relatif lama. Karena itu teknologi bioremediasi banyak digunakan untuk mempercepat proses pemulihan lahan yang tercemar minyak melalui pengaturan kondisi lingkungan, penambahan nutrisi (biostimulasi) dan penambahan mikroba dari luar (bioaugmentasi)^(3,4,5). Aplikasi teknik bioaugmentasi dilakukan dengan menggunakan mikroba hasil pengembangan di laboratorium^(7,8,9). Beberapa keuntungan yang ditawarkan oleh teknik bioaugmentasi ini adalah waktu penghilangan cemaran di tanah lebih cepat dan efisien dibandingkan dengan teknologi bioremediasi tanpa penambahan mikroba.

Tahapan proses yang penting dalam pengembangan mikroba untuk bioremediasi tanah tercemar minyak adalah isolasi mikroba dari tanah yang tercemar minyak dan uji kinerja jenis mikroba yang diperoleh tersebut. Jenis mikroba yang banyak digunakan dalam bioremediasi tanah tercemar minyak adalah *Pseudomonas*, *Bacillus* dan *Azotobacter*⁽¹⁰⁾. Mengingat kompleksitas senyawa hidrokarbon yang menjadi penyusun minyak bumi, maka perlu dikembangkan formulasi konsorsium mikroba yang tepat untuk mendegradasi cemaran minyak bumi.

Teknik bioaugmentasi dapat digunakan dalam berbagai aplikasi teknik bioremediasi *ex situ* seperti *landfarming*, komposting dan *biopile*. Teknik *landfarming* memiliki keunggulan dibandingkan dengan teknik *ex situ* lainnya yaitu proses yang digunakan lebih sederhana dan murah, dengan tingkat penghilangan yang tinggi. Namun teknik ini memiliki kelemahan yaitu membutuhkan lahan yang luas⁽¹¹⁾. Kondisi lingkungan untuk mendukung proses degradasi senyawa hidrokarbon oleh mikroba eksogen dalam teknik *landfarming* perlu diatur sedemikian sehingga cemaran minyak dapat dihilangkan dengan efektif. Faktor-faktor utama yang mempengaruhi adalah konsentrasi awal cemaran minyak di tanah, dosis mikroba yang diberikan, pemberian

nutrisi, aerasi, serta pengaturan kelembaban dan suhu. Seringkali untuk meningkatkan aerasi dan mempertahankan kelembaban tanah ditambahkan kompos atau bahan organik sehingga proses degradasi dapat berjalan dengan efektif^(10,12).

Penelitian ini dilakukan untuk menguji efektifitas pemberian dua jenis konsorsium bakteri hasil pengembangan di laboratorium, pengaruh dosis mikroba dan pengaruh pemberian bahan organik dalam menghilangkan cemaran minyak bumi di tanah dengan menggunakan teknik *land farming* skala bangku (*bench scale*). Hasil percobaan ini diharapkan dapat memberikan informasi tentang kinerja konsorsium bakteri tersebut untuk aplikasi bioremediasi di lahan tercemar minyak.

2. BAHAN DAN METODE

2.1 Strain Bakteri

Bakteri yang digunakan dalam percobaan ini adalah konsorsium bakteri dari genus *Bacillus* (strain 3.3 dan 6.9), *Pseudomonas* (strain 3.4) yang selanjutnya disebut K1, dan konsorsium bakteri *Enterobacter* (strain P6) dan strain yang belum teridentifikasi (strain P2), yang disebut dengan K2. Konsorsium bakteri yang digunakan berasal dari tanah tercemar minyak mentah di Siak, Riau.

2.2 Media Tumbuh Bakteri

Media yang digunakan untuk perbanyakan strain di lab adalah media Nutrien Broth (NB) yang berisi *meat extract* 3,0 g/L, pepton 5 g/L, dan NaCl 0,5 g/L. Media Bushnell dan Haas (BH)⁽¹³⁾ yang ditambahkan minyak mentah digunakan untuk memperbanyak strain di lab dalam kondisi terpapar senyawa hidrokarbon. Media BH terdiri dari 0,41 g/L MgSO₄, 1 g/L KH₂PO₄, 1 g/L K₂HPO₄, 0,08 g/L FeCl₂·6H₂O, 0,02 g/L CaCl₂, dan 1 g/L NH₄NO₃.

2.3 Perbanyakan Strain Bakteri

Masing-masing strain bakteri diperbanyak dalam 50 mL medium NB yang diinkubasi di atas shaker selama 24 jam pada suhu ruang. Setelah itu masing-masing kultur disentrifugasi pada kecepatan 2.000 rpm selama 10 menit. Pelet yang diperoleh disuspensikan dalam 10 mL media BH. Suspensi bakteri kemudian dipindahkan ke dalam 450 mL media BH yang berisi *yeast extract* 0,5 g/L dan 1% (v/v) minyak mentah steril (dari tambang minyak di Bojonegoro, Jawa Timur).

Masing-masing kultur dalam medium BH tersebut diaerasi dengan udara steril selama 9 hari. Udara steril berasal dari udara ruang yang

dipompa ke dalam 100 mL larutan NaCl fisiologis 0,85% dalam tabung impinjer. Masing-masing kultur kemudian disubkultur ke dalam 950 mL medium BH yang berisi *yeast extract* dan minyak mentah dengan konsentrasi yang sama seperti di atas, dan diinkubasi selama 2 minggu. Masing-masing kultur kemudian disentrifuse, dan pelet yang diperoleh disuspensikan dalam media BH dengan nilai OD = 1.00 atau populasi sel sebesar 10^{12} cfu/mL.

2.4 Pelaksanaan Percobaan

Tanah yang digunakan adalah tanah tercemar minyak dengan kandungan 5.84% yang berasal dari lokasi sumur minyak di Kecamatan Kawengan, Kabupaten Bojonegoro, Jawa Timur. Karakteristik tanah yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 1. Tanah tersebut sebagian besar terdiri dari pasir dan debu (86%) dengan kandungan bahan organik yang rendah. Tanah tersebut diaduk hingga homogen, kemudian 10

kg tanah ditempatkan pada kotak-kotak plastik berukuran 25x40x10 cm.

Percobaan yang dilakukan terdiri dari dua bagian. Percobaan pertama dilakukan untuk mengetahui pengaruh konsorsium mikroba dan dosis pemberiannya. Percobaan kedua dilakukan untuk mengetahui efek pemberian bahan organik sebagai *bulking agent* terhadap kinerja konsorsium bakteri yang diberikan. Suspensi bakteri hasil perbanyakan dalam medium BH dicampur satu sama lain sesuai dengan formulasi konsorsium yang diuji dengan perbandingan sama. Pada percobaan pertama, suspensi konsorsium mikroba dengan konsentrasi awal sebesar OD = 1.00 (populasi 10^{12} cfu/mL), kemudian diencerkan 10 dan 100 kali dengan media BH sehingga diperoleh populasi konsorsium bakteri dalam suspensi sebanyak 10^9 dan 10^6 cfu/mL. Pada percobaan kedua, digunakan suspensi konsorsium mikroba dengan dosis 10^9 cfu/mL.

Tabel. 1. Karakteristik tanah yang digunakan

Tekstur (pipet)			pH		Bahan Organik		HCl 25%					Nilai Tukar Kation						
pasir	Debu	liat	H ₂ O	KCl	Walkley & Black	Kjeldahl	P ₂ O ₅	K ₂ O	P ₂ O ₅ Olsen	P ₂ O ₅ Bray1	K ₂ O Morgan	Ca	Mg	K	Na	Total	KTK	KB
----- % -----					----- % -----		-- mg/100g--		----- mg/100g-----			----- Me/100g -----						
44	42	14	8,0	7,6	0,43	0,04	63	27	-	4,7	63	14	1,2	0,1	3,9	20	9,8	>100

Tanah diinokulasi dengan suspensi bakteri sesuai dosis perlakuan, setelah itu diaduk rata. Suspensi bakteri ditambahkan ke tanah setiap minggu selama 5 minggu (percobaan 1) atau 3 minggu (percobaan 2). Pupuk Urea dan NPK (15-15-15) ditambahkan masing-masing sebanyak 3.8 dan 2.4 g/kg tanah pada awal percobaan (minggu ke-0), dan 1.9 dan 1.2 g/kg tanah pada minggu ke-6 (percobaan 1) dan minggu ke-3 (percobaan 2).

Perlakuan yang diuji pada percobaan 1 adalah jenis dan populasi konsorsium. Jenis konsorsium bakteri yang digunakan yaitu campuran strain 3.3, 3.4 dan 6.9 (K1), campuran strain P2 dan P6 (K2)⁽¹⁴⁾, dan kontrol tanpa inokulasi (K0). Populasi konsorsium yang diuji adalah 10^6 (D1), 10^9 (D2) dan 10^{12} (D3) cfu/g tanah. Masing-masing perlakuan memiliki 3 ulangan.

Perlakuan yang diuji pada percobaan 2 adalah jenis konsorsium yang sama dengan percobaan 1, yaitu K1, K2 dan Kontrol (K0). Pada percobaan 2 ditambahkan bahan organik dari kompos dengan perbandingan komposisi tanah dan kompos adalah 3:1.

Sampel tanah diambil setiap minggu sebelum penambahan konsorsium atau

penambahan pupuk. Parameter yang diukur adalah populasi mikroba tanah (*total plate count*, TPC), pH, suhu dan Total Petroleum Hydrocarbon (TPH). pH tanah ditetapkan dalam pelarut air setelah dikocok selama 30 menit. Suhu tanah pada kedalaman 10 cm diukur tiap 3-4 hari menggunakan termometer. Kelembaban tanah dipertahankan pada kisaran 17-22% dengan cara melakukan penyiraman dan pengadukan tanah setiap 3-4 hari.

2.5 Analisis TPH

Nilai TPH ditentukan dengan metode gravimetri. Sampel tanah sebanyak 5 g dimasukkan ke dalam timbel kertas saring. Selanjutnya timbel kertas saring dimasukkan ke dalam corong pisah sokletasi. Minyak dalam sampel tanah diekstraksi dengan 150 ml n-heksana dalam *water bath* selama minimal 4 jam.

Hasil ekstraksi dipindahkan ke dalam labu rotary yang sudah diketahui beratnya, lalu didestilasi bertingkat pada suhu 70-80°C dengan menggunakan rotary evaporator untuk menguapkan n-heksana dan air. Setelah didinginkan, labu rotary yang berisi minyak ditimbang.

Nilai TPH dihitung dengan mempertimbangkan kadar air tanah. Nilai TPH dihitung berdasarkan rumus :

$$\% \text{ TPH} = \frac{M_1 - M_0}{M_0} \times f_k \times 100 \% \dots\dots\dots(1)$$

dimana :

- Mo = Bobot labu kosong (g)
- M1 = Bobot labu berisi ekstrak sampel (g)
- M2 = Bobot tanah (g)
- fk = Faktor koreksi kadar air = $\frac{100}{100 - \text{Kadar air}}$



Gambar 1. Perubahan kultur strain 3.3 dari hari ke-0 (kiri) dan hari ke-9 (kanan)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

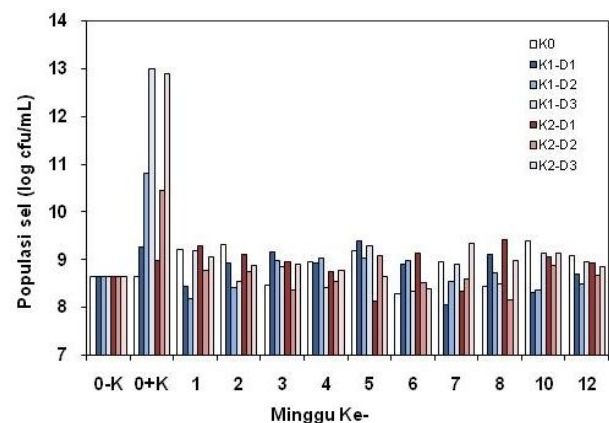
3.1 Pertumbuhan Bakteri dalam Media Perbanyakan

Kemampuan masing-masing isolat dalam mendegradasi minyak mentah di laboratorium ditandai dengan adanya perubahan warna media dari bening menjadi coklat keruh akibat minyak mentah larut dalam media (Gambar 1).

Perubahan ini kemungkinan disebabkan karena terbentuknya senyawa-senyawa intermediat yang larut dalam air akibat proses metabolisme senyawa hidrokarbon menjadi senyawa organik yang lebih sederhana, atau karena bakteri menghasilkan senyawa surfaktan. Perubahan warna paling cepat ditunjukkan oleh isolat 3.3, 3.4 dan 6.9 yaitu pada hari ke-3. Sedangkan isolat P2 dan P6 menghasilkan perubahan warna media BH di hari ke-5. Pada perlakuan kontrol (tanpa penambahan mikroba), minyak yang diberikan tetap mengapung di permukaan media hingga akhir percobaan (7 hari).

3.2 Pertumbuhan Bakteri dalam Tanah Tercemar

Total bakteri pada sampel tanah selama percobaan 1 dapat dilihat pada Gambar 2. Di awal percobaan, total bakteri tanah sebelum aplikasi konsorsium (0-K) adalah 8,7 log cfu/g. Penambahan bakteri ke tanah pada awal percobaan (0+K) menyebabkan peningkatan populasi bakteri hingga mencapai 13 log cfu/g pada perlakuan D3 (Gambar 2). Total bakteri tanah pada minggu pertama hingga akhir percobaan (minggu ke-12) tidak berbeda nyata dengan populasi bakteri di awal percobaan dan pada semua kombinasi perlakuan, yaitu berkisar antara 8,5 – 9,1 log cfu/g pada minggu ke-12.



Gambar 2. Populasi bakteri pada percobaan 1 hingga minggu ke-12.

Dari hasil percobaan ini terlihat bahwa pemberian bakteri ke tanah dengan dosis yang berbeda setiap minggu hingga minggu ke-5 tidak mempengaruhi populasi bakteri tanah selama percobaan. Hasil percobaan sebelumnya juga melaporkan bahwa penambahan mikroba (bioaugmentasi) tidak mempengaruhi populasi mikroba tanah pada tanah yang terkontaminasi solar⁽¹⁵⁾. Hal ini menunjukkan bahwa sebagian besar bakteri yang diberikan tidak dapat bertahan lama dalam kondisi alamiah, mungkin disebabkan karena persaingan dalam mendapatkan nutrisi ataupun kondisi lingkungan yang tidak mendukung pertumbuhan populasi bakteri dalam jumlah besar.

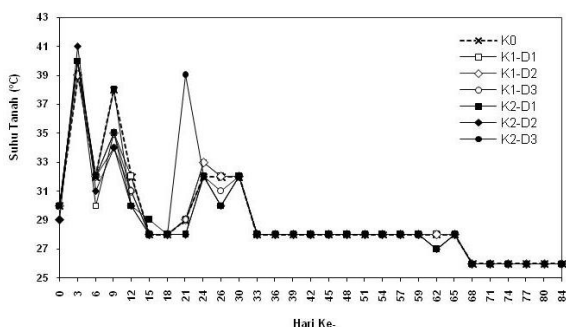
Populasi bakteri pada tanah yang tidak diberi pupuk dan tidak diinokulasi konsorsium menunjukkan penurunan yang signifikan setelah 12 minggu, yaitu dari 8,7 log cfu/g menjadi 7,2 log cfu/g. Dengan demikian, pemupukan berpengaruh terhadap populasi bakteri dalam tanah tercemar seperti yang telah diketahui secara umum. Dosis pupuk yang diberikan dalam penelitian ini adalah berdasarkan rasio C:N:P yaitu 100:10:1. Pemberian dosis yang lebih tinggi atau dalam bentuk lainnya kemungkinan dapat meningkatkan populasi bakteri dalam tanah, karena sebagian pupuk yang diberikan dalam

percobaan ini adalah urea yang mudah hilang melalui penguapan.

3.3 Suhu dan pH Tanah

Suhu tanah pada seluruh perlakuan mengalami peningkatan dari 30°C pada awal percobaan (hari ke-0) menjadi 40°C pada hari ke-3 (Gambar 4). Selanjutnya, suhu tanah berfluktuasi hingga hari ke-30, dengan puncak suhu tanah terjadi pada hari ke-9, 24 dan 30. Suhu tanah turun menjadi 30-32°C di hari ke-6, dan menjadi 28°C di hari ke-15. Pada hari ke-24 hingga ke-30 suhu tanah berada pada kisaran 29-32°C. Selanjutnya suhu tanah stabil pada nilai 28°C hingga hari ke-65, dan turun menjadi 26°C hingga akhir percobaan di hari ke-84.

Peningkatan suhu yang tinggi pada awal percobaan mengindikasikan adanya peningkatan aktivitas metabolisme bakteri tanah dalam mendegradasi senyawa hidrokarbon. Berdasarkan hasil percobaan, perubahan suhu pada tanah yang tidak diberi mikroba (K0) maupun tanah yang diberi tambahan bakteri (K1 dan K2) secara umum memiliki pola yang sama (Gambar 3). Hal ini menunjukkan bahwa pola perubahan suhu tersebut dipengaruhi terutama oleh mikroba indigenus. Hasil percobaan ini juga menunjukkan bahwa suhu berfluktuasi hingga satu bulan percobaan, dengan kecenderungan terjadi penurunan suhu, yang mengindikasikan proses metabolisme aktif bakteri tanah dalam mendegradasi senyawa hidrokarbon terjadi sekurangnya hingga 30 hari setelah percobaan dimulai.



Gambar 3. Suhu tanah selama percobaan 1 berlangsung.

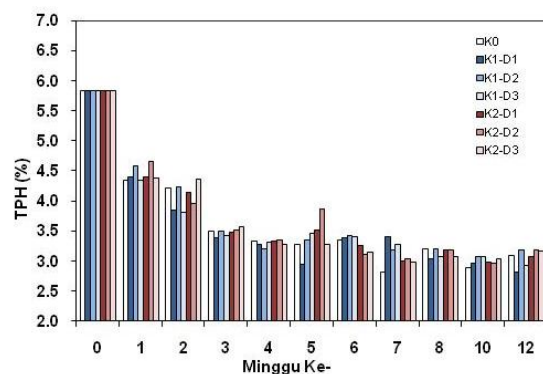
Berbeda dengan suhu tanah, pH tanah mengalami penurunan dari 8.0 menjadi hingga 7.6 pada minggu ke-2. Setelah itu pH tanah meningkat perlahan menjadi 7.8 pada minggu ke-5, dan meningkat tajam menjadi 8.5 pada minggu ke-6.

3.4 Nilai TPH

Nilai TPH tanah tercemar minyak di awal percobaan 1 adalah 5.8%. Nilai TPH tersebut

menurun cukup tajam hingga 3.3% pada minggu ke-4, setelah itu tidak terjadi lagi penurunan yang signifikan hingga akhir percobaan di minggu ke 12, yaitu menjadi hanya sekitar 2.8-3.2% dengan efektifitas penurunannya sekitar 53 % (Gambar 4). Nilai TPH ini masih berada di atas ambang baku mutu yang disyaratkan oleh KLHK yaitu di bawah 1%⁽¹⁶⁾. Efektifitas penurunan yang tidak terlalu tinggi tersebut kemungkinan disebabkan karena konsentrasi awal minyak bumi dalam tanah yang cukup tinggi yaitu 5.8%.

Pola penurunan nilai TPH pada perlakuan konsorsium dan dosis sama dengan pola penurunan nilai TPH pada kontrol (K0). Secara statistik, uji Anova satu arah menunjukkan bahwa perlakuan pemberian konsorsium bakteri ataupun perlakuan dosis yang diberikan tidak berpengaruh nyata terhadap nilai TPH selama berlangsung percobaan ($P > 0,10$). Sebagai contoh, pada Minggu ke-5, nilai TPH dari K0, K1 dan K2 masing-masing adalah 3,28%, 3,25% dan 3,55% ($P = 0,132$).



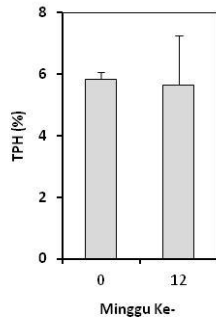
Gambar 4. Nilai TPH selama percobaan 1 berlangsung

Penurunan TPH yang cepat pada minggu-minggu awal percobaan (Gambar 4) disebabkan karena terjadi peningkatan aktifitas metabolisme mikroba tanah dalam mendegradasi senyawa hidrokarbon terutama senyawa rantai pendek alkana. Peningkatan aktifitas metabolisme ini ditandai dengan adanya peningkatan suhu tanah pada minggu pertama percobaan (Gambar 3) dan penurunan pH tanah pada minggu ke-1 dan ke-2, seperti yang dilaporkan sebelumnya⁽¹⁷⁾. Biodegradasi alkana yang terdapat dalam minyak bumi akan membentuk alkohol dan selanjutnya menjadi asam lemak⁽¹⁷⁾. Asam lemak hasil degradasi alkana dioksidasi lebih lanjut membentuk asam asetat dan asam propionat, sehingga pH tanah turun.

Dalam percobaan ini, fase penguraian senyawa hidrokarbon sederhana diduga berlangsung hingga minggu keempat. Pada minggu selanjutnya, aktifitas degradasi menurun diduga karena mikroba tanah membutuhkan waktu yang

lebih lama untuk menguraikan senyawa-senyawa hidrokarbon kompleks^(3,18).

Analisis TPH juga dilakukan pada tanah yang tidak diberi pupuk dan konsorsium bakteri pada akhir percobaan. Berbeda dengan nilai TPH perlakuan, nilai TPH pada tanah yang tidak diberi pupuk di akhir percobaan (minggu ke-12) tidak banyak berbeda dengan di awal percobaan, yaitu 5,6% (Gambar 5).

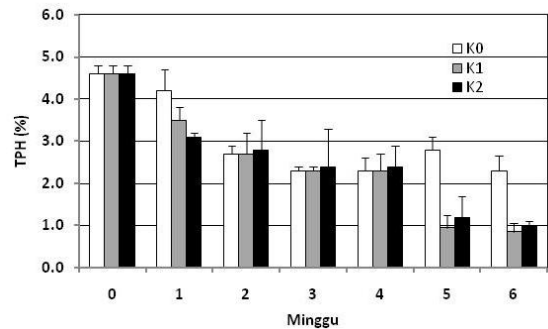


Gambar 5. Nilai TPH pada percobaan 1 pada tanah yang tidak diberi pupuk dan mikroba

3.5 Efek Penambahan Kompos terhadap Kinerja Konsorsium

Nilai awal TPH pada percobaan 2, yaitu pada tanah yang ditambahkan kompos adalah 4.6%. Berbeda dengan percobaan 1, nilai TPH pada tanah yang diberi kompos dan konsorsium bakteri tersebut turun hingga di bawah 1% pada minggu ke-5 setelah percobaan dimulai (Gambar 6). Sedangkan nilai TPH pada perlakuan K0 pada minggu ke-5 dan 6 berkisar antara 2.3 – 2.8 %.

Dari hasil percobaan 2 ini dapat dilihat bahwa pemberian *bulking agent* seperti kompos terhadap tanah yang tercemar minyak dapat meningkatkan efektifitas penurunan nilai TPH oleh konsorsium mikroba. Efek kompos dalam menurunkan polutan dalam tanah tercemar senyawa hidrokarbon juga telah dilaporkan sebelumnya oleh Hickman dan Reid⁽¹⁹⁾. Berdasarkan percobaan Hickman dan Reid, rasio kompos:tanah yang semakin besar hingga 4:1 menyebabkan residu senyawa hidrokarbon dalam tanah semakin kecil, yaitu mencapai 5,9% (dengan konsentrasi awal 10 g/kg) pada hari ke-84. Kompos dapat meningkatkan aerasi dan kelembaban tanah, dan mengandung mikroba tertentu yang dapat mendegradasi senyawa-senyawa kompleks. Pemberian *bulking agent* juga memberikan efek pengenceran kandungan minyak pada tanah tercemar, sehingga nilai TPH pada awal percobaan turun menjadi 4.6%.



Gambar 6. Nilai TPH pada tanah yang diberi tambahan kompos dan konsorsium mikroba.

Berdasarkan hasil penelitian ini, maka masalah yang menjadi tantangan para peneliti untuk program bioremediasi tanah tercemar minyak bumi dengan *landfarming* adalah bagaimana mempertahankan aktifitas metabolisme yang tinggi pada mikroba tanah agar laju penurunan TPH yang cepat dapat terus berlangsung. Bila senyawa hidrokarbon yang didegradasi pada awal percobaan sebagian besar adalah senyawa alkana rantai pendek, maka perlu penambahan mikroba yang mampu mendegradasi senyawa karbon yang lebih kompleks.

Hasil percobaan ini menunjukkan bahwa mikroba yang ditambahkan tidak mempengaruhi populasi bakteri tanah. Hal ini menimbulkan isu lain yang perlu dipecahkan yaitu seberapa besar *survival rate* konsorsium bakteri yang ditambahkan ke tanah, terutama setelah mengalami fase pertumbuhan yang lama di media buatan. Selain itu, mengingat aktifitas penambahan minyak di lokasi sumur minyak berlangsung setiap hari dan dalam jangka waktu yang lama, diduga populasi mikroba indigenus didominasi oleh bakteri pendegradasi senyawa hidrokarbon yang sudah beradaptasi dengan kondisi lingkungan tercemar.

Hasil percobaan ini menunjukkan bahwa ada faktor lain selain dosis dan komposisi mikroba yang dapat berpengaruh terhadap keberhasilan degradasi senyawa hidrokarbon di tanah⁽²⁰⁾, yaitu penambahan bahan organik dan jenis tanah. Jenis tanah yang digunakan dalam percobaan ini adalah didominasi oleh fraksi pasir (*sand*) dan debu (*silt*) masing-masing sebesar 40%, dengan nilai pH 8,0 dan kandungan bahan organik yang rendah yaitu 0,04% (Tabel 1). Hasil penelitian Bento et al.⁽²¹⁾ menunjukkan bahwa tanah Long Beach California, Amerika Serikat menunjukkan proses degradasi senyawa hidrokarbon yang lebih tinggi dibandingkan tanah yang berasal dari Hongkong, China. Tanah Long Beach memiliki pH lebih rendah dibandingkan tanah dari Hongkong (masing-masing dengan pH 6,3 dan 7,7). Begitupula Arun et al. dan Hamamura et al.^(22,23) menyimpulkan bahwa efektifitas mikroba

pendegradasi hidrokarbon tergantung dari jenis tanah.

Pemberian bahan organik seperti kompos dapat membantu mikroba dalam mendegradasi senyawa hidrokarbon di tanah. Namun aplikasi bahan organik ini untuk bioremediasi skala besar masih perlu dikaji terutama dari segi biaya karena dibutuhkan dalam jumlah besar. Untuk mengurangi biaya transportasi, maka alternatif pemanfaatan bahan organik tersebut adalah pemanfaatan limbah organik yang banyak ditemukan di sekitar lokasi bio-remediasi.

4. KESIMPULAN

- 1) Penambahan konsorsium mikroba yang diuji ke tanah tercemar asal Bojonegoro tanpa penambahan bahan organik tidak berpengaruh terhadap penurunan TPH. Nilai TPH pada semua kombinasi perlakuan turun hingga 53% selama 12 minggu.
- 2) Dosis bakteri yang digunakan tidak berpengaruh terhadap tingkat degradasi minyak bumi di tanah Bojonegoro.
- 3) Penambahan bahan organik dapat membantu konsorsium bakteri dalam menurunkan nilai TPH di tanah hingga di bawah 1%.

PERSANTUNAN

Ucapan terimakasih ditujukan kepada Sri Herlina atas bantuannya dalam analisis TPH.

DAFTAR PUSTAKA

1. Tang, J., Wang, M., Wang, F., Sun, Q., and Zhou, Q., (2011), Eco-toxicity of petroleum hydrocarbon contaminated soil. *J. Environ.Sci.* 23: 845-851.
2. Brewer, R., Nagashima, J., Kelley, M., Heskett, M., and Rigby, M., (2013), Risk-based evaluation of total petroleum hydrocarbons in vapor intrusion studies. *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 10: 2441-2467.
3. Lee, E. H., Kang, Y.S., and Cho, K.S., (2011), Bioremediation of diesel contaminated soils by natural attenuation, Biostimulation and Bioaugmentation employing *Rhodococcus* sp. EH831. *Korean J. Microbiol. Biotechnol.* 39:86-92.
4. Kuhad, R.C. and Gupta, R., (2009), Biological remediation of petroleum contaminants. In Singh, A., R.C. Kuhad and O.P. Ward (Eds.). *Soil Biology Vol. 17. Advances in Applied Bioremediation.* Springer-Verlag, Berlin. 365pp.
5. Kuppusamy, S., Thavamani, P., Megharaj, M., and Naidu, R., (2016), Bioaugmentation with novel microbial formula vs. natural attenuation of a long-term mixed contaminated soil—treatability studies in solid-and slurry-phase microcosms. *Water, Air, Soil Pollut.* 227: 25.
6. Mohan, S. V., Kisa, T., Ohkuma, T., Kanaly, R. A., and Shimizu, Y., (2006), Bioremediation technologies for treatment of PAH-contaminated soil and strategies to enhance process efficiency. *Rev. Environ. Sci. Bio/Technol.* 5: 347-374.
7. Cerqueira, V.S., Maria do Carmo, R.P., Camargo, F.A., and Bento, F.M., (2014), Comparison of bio-remediation strategies for soil impacted with petrochemical oily sludge. *Int. Biodet. Biodeg.* 95: 338-345.
8. Thenmozhi, R.A., Nagasathya and Thajuddin, N., (2011), Studies on biodegradation of used engine oil by consortium cultures. *Adv. Environ. Biol.* 5:1051-1057.
9. Wang, H., Xu, R., Li, F., Qiao, J. and Zhang, B., (2010), Efficient degradation of lube oil by a mixed bacterial consortium. *J. Environ. Sci.* 22:381-388.
10. Baruah, R., Kalita, D.J., Saikia, B.K., Gautam, A., Singh, A.K., and Boruah, H.P.D. (2016), Native hydrocarbonoclastic bacteria and hydrocarbon mineralization processes. *Inter. Biodet. Biodeg.* 112: 18-30.
11. Maila, M.P., and Cloete, T.E., (2004), Bioremediation of petroleum hydrocarbons through landfarming: Are simplicity and cost-effectiveness the only advantages?. *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* 3: 349-360.
12. Dadrasnia, A.R., and Agamuthu, P., (2013), Dynamics of diesel fuel degradation in contaminated soil using organic wastes. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 10:769-778.
13. Bushnell, L.D., Haas, H.F., (1940), The utilization of hydrocarbons by microorganisms. *Journal of Bacteriology* 41:653-673.
14. Prayitno, J., Prisha, R. dan Herlina, S., (2012), Formulasi konsorsium mikroba asal pertambangan minyak Siak Riau dalam mendegradasi senyawa hidrokarbon. *Jurnal Teknologi Lingkungan.* 13:123-130.
15. Bento, F. M., Camargo, F. A., Okeke, B. C., and Frankenberger, W. T., (2005), Comparative bioremediation of soils contaminated with diesel oil by natural attenuation, biostimulation and bioaugmen-

- tation. *Biores. Technol.* 96:1049-1055.
16. Kementerian Lingkungan Hidup., (2003), Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No. 128 tentang *Tata Cara dan Persyaratan Teknis Pengolahan Limbah Minyak Bumi dan Tanah Terkontaminasi oleh Minyak Bumi secara Biologis*.
 17. Rojo, F., (2010), Carbon catabolite repression in *Pseudomonas*: optimizing metabolic versatility and interactions with the environment. *FEMS Microbiol. Rev.* 34: 658-684.
 18. Haritash, A.K., and Kaushik, C.P., (2009), Biodegradation aspects of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs): A review. *J. Hazard. Mat.* 169: 1-15.
 19. Hickman, Z. A., and Reid, B. J., (2008), The co-application of earthworms (*Dendrobaena veneta*) and compost to increase hydrocarbon losses from diesel contaminated soils. *Environ. Int.* 34:1016-1022.
 20. Tyagi, M., da Fonseca, M.M.R., and de Carvalho, C. C., (2011), Bioaugmentation and biostimulation strategies to improve the effectiveness of bioremediation processes. *Biodegradation.* 22: 231-241.
 21. Bento, F.M., Camargo, F.A.O, Okeke, B.C., dan Frankenberger, W.T., (2005), Comparative bioremediation of soils contaminated with diesel oil by natural attenuation, biostimulation and bioaugmentation. *Biores. Technol.* 96:1049-1055.
 22. Arun, K., Rajesh, S. Ashok, M. and Singh, R.N., (2011), PAHs utilizing bacterial population and physicochemical variability in oil contaminated soils. *Nature and Science.* 9:32-37.
 23. Hamamura, N., S.A. Olson, D.M. Ward and W.P. Inskeep., (2006), Microbial population dynamics associated with crude-oil biodegradation in diverse soils. *Appl. Environ. Microbiol.* 72(9):6316-6324.