

Perbandingan Biaya pada Teknik-Teknik Remediasi Tanah Tercemar Minyak Bumi

R. Desrina

Peneliti Madya pada Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Minyak dan Gas Bumi "LEMIGAS"

Jl. Ciledug Raya Kav. 109, Cipulir, Kebayoran Lama, Jakarta Selatan 12230, Indonesia

Tromol Pos : 6022/KBYB-Jakarta 12120, Telepon : 62-21-7394422, Faksimile : 62-21-7246150

Dosen di Jurusan Teknik Perminyakan Trisakti, Kampus A. Jl. Kiyai Tapa No. 1 Jakarta 11440, Telpon 5670496

Teregistrasi I Tanggal 19 Desember 2011; Diterima setelah perbaikan tanggal 23 Desember 2011

Disetujui terbit tanggal: 30 Desember 2011

S A R I

Remediasi tanah tercemar minyak bumi telah banyak dilakukan oleh perusahaan minyak bumi di Indonesia. Di antaranya yang telah menjadi acuan adalah Surat Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 128 Tahun 2003, tentang tata cara remediasi tanah tercemar minyak bumi secara biologis. Pada hakekatnya, remediasi tanah tidak hanya dapat dilakukan dengan cara biologis saja. Teknik-teknik remediasi non-biologis yang memanfaatkan sifat-sifat fisika dan kimia kontaminan juga dapat digunakan, misalnya teknik desorpsi termal dan teknik cuci lahan. Keberhasilan bioremediasi masih menjadi bahan polemik, mengingat berbagai senyawa atau komponen hidrokarbon di dalam minyak bumi mempunyai sifat rekalsitran. Polemik ini juga menyangkut tentang biaya operasional yang sering dikatakan bahwa biaya bioremediasi lebih murah dibanding dengan biaya cara-cara non-biologis. Tulisan ini mencoba menjabarkan hasil studi tentang perbandingan biaya dari beberapa teknik remediasi. Diharapkan tulisan ini dapat digunakan sebagai pedoman bagi para industri minyak pengguna teknologi remediasi maupun pemerintah sebagai regulator lingkungan. Dan pada kelanjutannya, dapat pula diterbitkan pedoman bagi tata cara teknik remediasi secara non-biologis.

Kata kunci: lingkungan hidup, pencemaran minyak, remediasi

ABSTRACT

Remediation for oil contaminated soil has been conducted by the oil companies in Indonesia. One of the guidance for remediation techniques is those stated in the Ministerial Decree for Environment describing biological treatment for oil contaminated soils. In fact, bioremediation is not the only remedial technique for soils. There are other non-biological techniques which manipulate physical and chemical properties of the contaminants, such as thermal desorption and soil washing. The success of using bioremediation is still controversial, regarding that some of the hydrocarbon components of crude oil are recalcitrant. The discussions are also due to the remedial operational cost which is claimed that cost of bioremediation is lower than those of other non-biological methods. This paper describes results of the cost comparison study of some remediation techniques. The author wishes that this paper could be used as reference by the oil companies concerned with remediation techniques as well as the government as the environmental regulator. And eventually, the guidance for non-biological remediation techniques could also be established.

Keywords: environment, oil pollution, remediation

I. PENDAHULUAN

Kegiatan remediasi sudah banyak diterapkan pada lahan-lahan tercemar, terutama pada lahan tercemar minyak bumi. Beberapa perusahaan minyak di Indonesia, terutama sektor hulu, telah menggunakan teknik bioremediasi untuk mengolah lahan di sekitar area kegiatan mereka yang oleh berbagai sebab-misalnya karena *blow out* atau karena kecelakaan pada waktu pengangkutan minyak telah tercemari oleh minyak bumi. Teknik remediasi juga telah banyak dilakukan pada kasus-kasus pencemaran pantai akibat kecelakaan kapal tanker pengangkut minyak, misalnya dengan menggunakan dispersan.

Teknik remediasi, walaupun seringkali menggunakan teknologi yang sama atau mirip dengan teknik pengolahan limbah, bukan merupakan cara atau sarana pengolahan limbah. Pada pengolahan limbah, baik limbah padat, limbah cair, maupun limbah gas, maka limbah-limbah tersebut masih berada dalam keadaan terkontrol sebagai hasil samping suatu proses industri. Sementara, remediasi sesuai dengan istilahnya, digunakan untuk memulihkan (*remediate*) keadaan, terutama lingkungan hidup, yang telah mengalami pencemaran⁽¹⁾. Tidaklah tepat bila istilah remediasi digunakan pada pengolahan limbah di mana limbah ini masih dalam keadaan terkontrol atau terkendali.

Teknik bioremediasi telah digalakkan oleh pemerintah dengan diterbitkannya Surat Keputusan (SK) Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 128 Tahun 2003, tentang Tatacara dan Persyaratan Teknis Pengolahan Limbah Minyak Bumi dan Tanah Terkontaminasi oleh Minyak Bumi secara Biologis⁽²⁾. Dengan diterbitkannya SK ini beberapa perusahaan minyak di Indonesia, misalnya UNOCAL di Kalimantan dan CPI di Sumatera, telah mencoba untuk menerapkan teknik ini pada lahan-lahan mereka. Keberhasilan teknik bioremediasi ini masih menjadi bahan polemik, mengingat berbagai senyawa atau komponen hidrokarbon di dalam minyak bumi mempunyai sifat rekalsitran (sukar terdegradasi). Polemik ini juga menyangkut tentang biaya operasional yang sering dikatakan bioremediasi lebih murah dibanding dengan remediasi non-biologis.

Pada hakekatnya, remediasi lahan tercemar minyak bumi tidak hanya dapat dilakukan dengan cara biologis saja. Teknik-teknik remediasi lain dengan cara non-biologis, yaitu cara fisika/kimia dan

termal, juga dapat digunakan. Cara non-biologis ini antara lain adalah teknik cuci lahan (*soil washing*) yang memanfaatkan sifat kelarutan kontaminan dan teknik desorpsi termal (*thermal desorption*) yang memanfaatkan sifat penguapan dari kontaminan⁽³⁾. Beberapa industri perminyakan hulu di Indonesia juga telah mencoba berbagai teknik remediasi ini. Dengan adanya cara-cara non-biologis ini, penggunaan teknologi remediasi mempunyai pilihan untuk menentukan teknik mana yang lebih cocok untuk remediasi lahan sesuai dengan kondisi lingkungannya. Faktor kondisi ini sangat penting untuk memperkirakan keberhasilan dan biaya operasional dari teknik remediasi yang akan dipilihnya. Tidak saja kondisi lahan, misalnya jenis dan tekstur tanah, tetapi juga kondisi dan sifat-sifat minyak bumi yang mencemarinya. Kesemuanya ini akan menentukan keberhasilan dan biaya dari teknik remediasi yang digunakan tersebut.

Polemik tentang keberhasilan dan biaya operasional dari berbagai teknik remediasi lahan tercemar minyak bumi masih berlanjut hingga saat ini. Tulisan ini mencoba menjabarkan hasil kajian tentang struktur biaya dari beberapa teknik remediasi. Diharapkan tulisan ini dapat digunakan sebagai pedoman bagi para industri minyak pengguna teknologi remediasi maupun pemerintah sebagai regulator lingkungan. Tulisan ini mudah-mudahan dapat dipakai sebagai bahan untuk membahas teknik-teknik remediasi yang digunakannya. Teknik remediasi pada kajian ini dibatasi hanya pada tiga cara yaitu: bioremediasi, desorpsi termal, dan cuci lahan.

II. TEKNOLOGI REMEDIASI

A. *Bioremediasi*

Bioremediasi adalah salah satu teknik remediasi yang menggunakan proses biologis untuk menghancurkan atau mengubah kontaminan. Bioremediasi dapat terjadi secara intrinsik (natural) atau secara dipercepat (*rekayasa/engineering*) dengan penambahan-penambahan nutrien, elektron donor atau elektron akseptor, dan/atau mikro organisme ke dalam tanah. Bioremediasi dapat dilakukan secara *in-situ* maupun *ex-situ*. Berbagai teknik bioremediasi diantaranya adalah: *Bioventing*, Bioremediasi Fasa Padat (*Ladfarming* dan *Composting*), *Bioslurry*, dsb. Dalam tulisan ini tidak dimaksudkan untuk menguraikan satu-persatu teknik bioremediasi tersebut.

Dari berbagai teknik bioremediasi, *landfarming* merupakan teknik bioremediasi yang lebih sering dilakukan. Teknik ini paling sederhana dibanding dengan teknik-teknik bioremediasi lainnya, terutama dalam hal cara aerasinya, yaitu cara pemberian udara atau oksigen yang sangat penting bagi respirasi mikroorganisme yang aktif dalam proses biodegradasi zat-zat organik. *Landfarming* menggunakan bajak, sebagaimana membajak tanah, agar tanah menjadi gembur dan teraerasi. Istilah lain untuk *landfarming* adalah *Land Treatment* dan *Solid Phase Treatment*.

Landfarming memang tidak disangkal lagi mempunyai keuntungan dalam hal peralatan yang sederhana. Di samping itu, bioremediasi mengubah senyawa kimia melalui proses biodegradasi dan terjadi proses detoksifikasi. Sementara teknik-teknik remediasi non-biologis, kecuali insinerasi, tidak mengubah sifat kontaminan tetapi hanya membersihkan tanah dari kontaminannya.

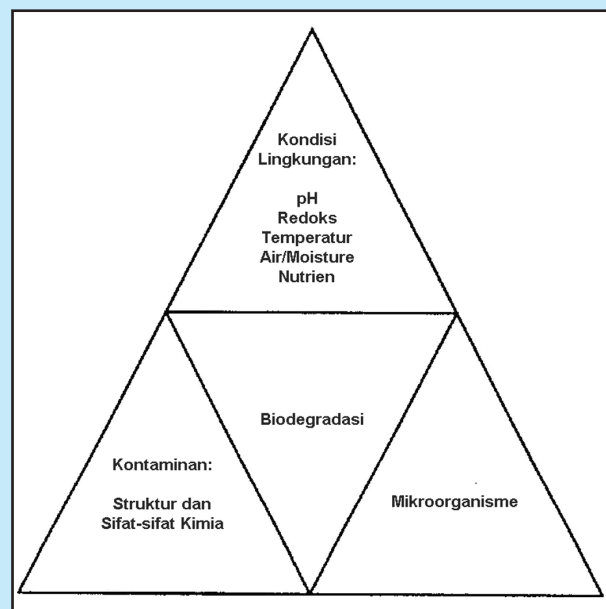
Namun demikian, bioremediasi bukanlah tidak memiliki kekurangan atau kelemahan⁽⁴⁾. Kekurangan dan kelemahan ini antara lain adalah: (i) Unjuk kerja sukar diprediksi; *scale up* sulit dilakukan dari skala laboratorium dan pilot ke skala lapangan; (ii) Keberhasilan proyek bioremediasi lebih banyak ditentukan oleh kemampuan operator lapangan dalam hal menciptakan dan menjaga kondisi lingkungan proses bagi pertumbuhan mikroorganisme; (iii) Mikroorganisme peka terhadap temperatur, pH, toksisitas dan konsentrasi kontaminan, kandungan air, konsentrasi nutrisi dan oksigen; (iv) Penurunan aktivitas mikroba akan memperlambat proses degradasi dan menambah waktu pengolahannya; (v) Bila aktivitas mikroba berhenti (misalnya adanya pembentukan metabolit yang toksik), maka untuk memulai kembali proses biodegradasi akan sangat sulit; (vi) Tujuan pembersihan (*cleanup*) mungkin tidak akan dapat dicapai sepenuhnya dengan teknik bioremediasi karena beberapa jenis kontaminan mempunyai sifat rekalsitran atau tidak terdegradasi atau terdegradasi hanya sebagian, sehingga penghilangan kontaminan secara mikrobiologis tidak dapat mencapai batas konsentrasi yang diinginkan; (vii) Pada saat konsentrasi kontaminan menurun, maka proses biodegradasi juga akan melambat dan mikroorganisme dapat berpindah kepada sumber energi lainnya atau bahkan berhenti tumbuh sama sekali; (viii) Bioremediasi sering memerlukan waktu yang sangat lama (8 hingga 12 bulan).

Dibanding dengan teknik-teknik remediasi non-biologis, maka teknik bioremediasi mempunyai variabel proses lebih banyak. Dengan variabel proses yang lebih banyak ini maka perlu kehati-hatian dan perhitungan yang cermat agar proses biodegradasinya dapat berjalan seperti yang dikehendaki. Pada Gambar 1 dicantumkan segi-tiga bioremediasi yang menggambarkan berbagai variabel proses yang mempengaruhinya.

B. Desorpsi Termal

Desorpsi Termal menggunakan energi panas untuk memisahkan kontaminan minyak bumi yang terdapat di dalam tanah dengan cara penguapan. Desorpsi termal tidak sama dengan insinerasi, walau sama-sama menggunakan energi panas. Minyak bumi yang terpisah dalam bentuk uap ini kemudian dapat dikumpulkan atau bila tidak memungkinkan dapat langsung dihancurkan secara termal. Tanah yang sudah bersih kemudian dapat dikembalikan ke tempat asalnya.

Desorpsi termal sudah cukup lama digunakan di USA untuk pemulihan lahan yang tercemar. Metode desorpsi termal ini telah menjadi salah satu teknik remediasi pilihan karena adanya beberapa keuntungan, diantaranya keefektifannya dalam penghilangan berbagai jenis kontaminan organik⁽⁵⁾.



Gambar 1
Segitiga Bioremediasi

Pada Gambar 2 dicantumkan secara skematis proses desorpsi termal dari lahan yang tercemar minyak bumi⁽⁶⁾. Sistem desorpsi termal ini mempunyai dua unit proses, yaitu desorber dan pengolahan gas.

Desorber berfungsi sebagai pemisah kontaminan minyak dari keterikatannya dengan tanah. Pemisahan ini dilakukan dengan menggunakan pemanasan baik langsung maupun tidak langsung. Berbagai jenis pemanas dapat digunakan, diantaranya adalah: *Indirect Fired Rotary*, *Direct Fired Rotary*, dan *Heated Screw*. Pemanas-pemanas semacam ini mudah diperoleh secara komersial.

Terdapat dua jenis pemanas, yaitu pemanas dengan temperatur tinggi (*High Temperature Thermal Desorption*, HTTD) dan pemanas dengan temperatur rendah (*Low Temperature Thermal Desorption*, LTTD). HTTD beroperasi pada suhu 320-560°C (600-1,000°F) umumnya digunakan bersama-sama dengan proses solidifikasi atau insinerasi. Sedang LTTD beroperasi pada suhu lebih rendah yaitu 90-320°C (200-600°F) digunakan untuk meremediasi tanah terkontaminasi minyak bumi. Pada suhu yang rendah ini, zat-zat organik di dalam tanah tidak akan rusak sehingga tanah yang sudah diremediasi masih dapat digunakan kembali. LTTD dikenal juga sebagai *low-temperature thermal volatilization*, *thermal stripping*, atau *soil roasting*.

Unit proses kedua adalah pengolahan gas (*offgas treatment*) yang diperlukan untuk mengolah lebih lanjut uap-uap kontaminan yang sudah terlepas dari tanah. Pada dasarnya terdapat tiga opsi untuk mengolah gas ini, yaitu: dibuang ke udara, dikumpulkan, atau dihancurkan. Dengan desorpsi termal jenis LTTD, gas-gas minyak bumi dapat dikumpulkan dengan proses kondensasi. Minyak yang terkumpul ini dapat digunakan kembali sebagai bahan bakar pada unit desorber.

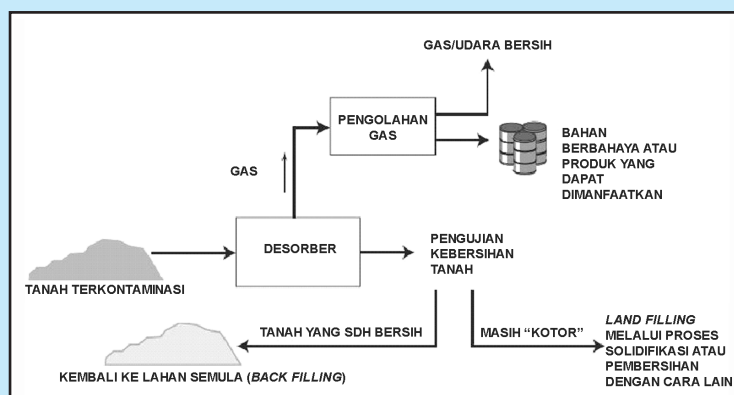
Sistem desorpsi termal ini dapat meremediasi 20 ton tanah terkontaminasi perjamnya. Proses remediasi dapat berjalan sangat cepat hanya dalam hitungan beberapa minggu saja. Desorpsi termal akan bekerja sangat baik pada kondisi tanah yang kering. Seringkali, desorpsi termal ini diguna-

kan pada saat teknik remediasi lainnya tidak mampu, misalnya bila konsentrasi minyak di dalam tanah sangat besar.

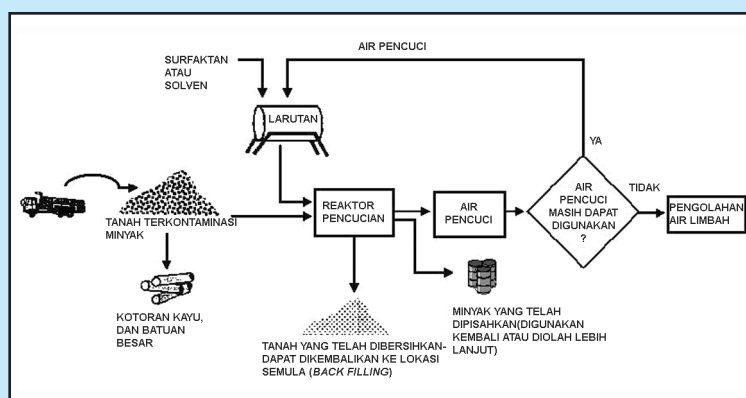
C. Cuci Lahan

Pada awalnya, cuci lahan (*soil washing*) dikenal sebagai teknologi pemisahan sederhana yang menggunakan air untuk memisahkan pasir yang tercampur dengan tanah, atau dengan kata lain teknik membersihkan pasir⁽⁷⁾. Dalam perjalanannya diketahui bahwa berbagai jenis kontaminan baik anorganik maupun organik menempel atau teradsorpsi pada partikel tanah yang halus, yaitu partikel debu (*silt*) dan lempung (*clay*). Berbagai kontaminan ini dapat “dicuci” dengan berbagai jenis larutan pencuci berbasis air, misalnya surfaktan dan zat-zat kimia kelat (*chelating agent*).

Proses-proses komersial bermunculan dan yang membedakan mereka adalah pada jenis larutan pencuci dan urutan unit prosesnya. Pada Gambar 3



Gambar 2
Teknik remediasi tanah dengan cara desorpsi termal



Gambar 3
Proses cuci lahan (*soil washing*)

dicantumkan alur proses cuci lahan secara umum⁽⁸⁾. Mula-mula, tanah yang tercemar diangkut (misalnya dengan menggunakan truk) ke tempat pengolahan. Langkah pertama adalah memisahkan material kasar/ besar misalnya kayu dari tanah. Kemudian tanah yang sudah dibersihkan dari kayu-kayu ini dimasukkan ke dalam reaktor dan ke dalam reaktor ditambahkan air yang mengandung bahan pencuci. Bahan pencuci inilah yang berfungsi sebagai larutan “pencuci tanah” yang akan memisahkan tiga fasa, yaitu tanah, air, dan kontaminan. Tanah berada di lapisan paling bawah yang dapat dipisahkan dan dikembalikan ke lahan semula. Kontaminan akan terpisah oleh proses pencucian dan dapat ditampung di dalam drum, sementara air pencuci dapat diresirkulasi kembali. Air pencuci yang sudah tidak dapat didaur ulang kemudian dialirkan ke tempat pengolahan limbah cair untuk diolah lebih lanjut sebelum dibuang ke lingkungan.

Kelebihan dari remediasi cuci lahan ini terutama adalah dapat mengurangi volume tanah dan kandungan kontaminannya yang selanjutnya tanah dapat diolah dengan teknik remediasi lainnya. Pengurangan volume ini penting artinya dalam penurunan biaya untuk pembersihan tanah selanjutnya.

Berbagai zat aktif permukaan, diantaranya zat-zat biosurfaktan sebagai larutan pencuci, telah banyak dikembangkan untuk memperoleh proses pencucian yang lebih efektif⁽⁹⁾. Pengembangan lain ditujukan bagi proses pemisahan menggunakan proses fisika, diantaranya adalah dengan menggunakan sistem flotasi gelembung udara⁽¹⁰⁾ dan hidrosiklon⁽¹¹⁾.

III. ANALISIS STRUKTUR BIAYA

Komponen biaya pada setiap proyek remediasi tanah pada dasarnya adalah sebagaimana diuraikan berikut ini⁽¹²⁾:

Persiapan Lahan. Biaya ini meliputi penyiapan lahan untuk membangun dan mengoperasikan fasilitas remediasi yang akan diselenggarakan. Termasuk dalam komponen biaya ini antara lain adalah desain tata letak proyek, survei dan logistik lapangan, akses jalan, penyiapan fasilitas penunjang, hubungan utilitas (air dan listrik), dan opsi bangunan.

Perijinan dan Pemenuhan Peraturan. Komponen biaya ini meliputi antara lain perijinan, sistem pemantauan, dan prosedur serta protokol analisis.

Peralatan. Termasuk dalam komponen ini adalah peralatan-peralatan umumnya, peralatan proses,

peralatan untuk mengelola hasil olahan tanah dan residu kontaminan.

Startup dan Biaya-biaya tetap. Komponen biaya ini meliputi mobilisasi, pengujian, asuransi, pajak, dan inisiasi program-program pemantauan lingkungan. Biaya mobilisasi merupakan biaya terbesar dalam komponen ini.

Tenaga Kerja. Biaya tenaga kerja meliputi biaya tenaga operasional, supervisi, administratif, profesional, teknisi, dan pemeliharaan.

Bahan, Material dan Utilitas. Termasuk dalam komponen ini adalah bahan bakar, listrik, bahan-bahan mentah, material-material yang diperlukan di dalam proses pengolahan.

Pengolahan dan Pembuangan Residu. Dalam proses remediasi akan dihasilkan residu atau bahan sisa, misalnya air, minyak, padatan, lumpur, atau gas, yang memerlukan pengelolaan lebih lanjut.

Pemantauan dan Analisis Laboratorium. Termasuk dalam biaya ini adalah biaya pemantauan dan analisis laboratorium untuk memonitor unjuk kerja dan kondisi proses, serta bahan hasil olahannya.

Modifikasi, Perbaikan, dan Penggantian Suku Cadang. Termasuk dalam komponen biaya ini adalah penyesuaian kembali rancang bangun, modifikasi fasilitas, penjadwalan ulang pemeliharaan, dan penggantian peralatan dan suku cadang.

Demobilisasi. Segera setelah remediasi selesai, maka semua peralatan dan fasilitas yang digunakan selama remediasi berlangsung harus segera diangkut dan lahan yang digunakan dalam proyek dikembalikan pada kondisi semula.

IV. PEMBAHASAN

Sebagaimana produk komersial, maka informasi tentang biaya merupakan hal penting bagi pengguna jasa yang akan melakukan kegiatan remediasi lahan yang tercemar. Pengguna jasa ini tentu akan memilih teknologi yang dipandang paling efektif dan murah. Sayangnya, banyak informasi tentang biaya remediasi ini hanya menunjukkan biaya satuannya saja. Sebagai contoh, misalnya yang disebutkan oleh FRTR, Federal Remediation Technologists Roundtable⁽¹³⁾. Pada Tabel 1 disarikan biaya remediasi sebagaimana dikutip dari FRTR tersebut.

Dengan hanya mengandalkan data biaya satuan ini, maka akan sangat sulit dan tidak akurat untuk

membandingkan berbagai biaya teknik remediasi yang akan digunakan. Biaya satuan tersebut umumnya hanya dihitung dari biaya dasar atau biaya standar saja sebagaimana diuraikan dalam butir 3 di atas.

Biaya satuan yang mungkin dapat digunakan dalam satu kondisi tidak dengan serta merta dapat digunakan pada lahan lain dengan kondisi yang berbeda. Sebagaimana unjuk kerja suatu teknik remediasi, maka biaya teknik remediasi juga akan sangat tergantung pada berbagai faktor yang terdapat di lapangan (*site-specific conditions*)⁽¹⁴⁾.

Faktor-faktor yang akan mempengaruhi biaya, pada hakekatnya dapat dibagi menjadi tiga bagian, yaitu: (a) karakteristik tanah, (b) karakteristik zat pencemar, dan (c) variabel proses operasi. Faktor keempat (d) yang tidak kalah penting adalah kondisi iklim, terutama akan sangat berpengaruh pada kegiatan remediasi dengan cara *landfarming*⁽¹⁵⁾.

Pada Tabel 2 dan Tabel 3, disarikan perbandingan berbagai faktor tersebut untuk ketiga teknik remediasi yang dibahas dalam tulisan ini.

a. Karakteristik Tanah.

Karakteristik tanah akan berpengaruh pada permeabilitas, kandungan air, dan densitas tanah. Pada *landfarming*, misalnya, penyebaran secara merata dari nutrisi dan kandungan air sangat tergantung pada tekstur tanahnya. Tanah yang mengandung banyak lempung cenderung akan menggumpal dan akan sulit untuk proses aerasi sehingga kandungan oksigen menjadi sangat kecil. Distribusi nutrisi secara merata pada tanah yang berlempung ini juga akan sulit dicapai.

Masalah lempung dalam *landfarming* ini dapat diatasi dengan penambahan bahan-bahan lain (*soil amendments*), misalnya gipsum, serbuk gergaji, atau jerami. Dengan sendirinya penambahan bahan-bahan ini juga akan menambah biaya operasionalnya.

Untuk desorpsi termal, pada dasarnya untuk semua jenis tanah dapat dilakukan remediasi dengan cara ini⁽¹⁶⁾. Namun, tanah dengan karakteristik berbeda memerlukan perlakuan pendahuluan yang berbeda. Misalnya, tanah yang berlempung memerlukan proses pendahuluan dengan pencampuran tanah berpasir terlebih dulu. Hal ini disebabkan tanah berlempung akan menyebabkan terjadinya aglomerasi dan mengakibatkan sulitnya perpindahan panas sehingga proses penguapan kontaminan memerlukan waktu yang lebih lama. Sementara pada remediasi cuci

Tabel 1
Perbandingan biaya remediasi
berdasar harga satuan*

Biaya, USD/m ³						
Landfarming	Desorpsi Termal				Cuci Lahan	
	Skala Kecil		Skala Besar		Skala Kecil	Skala Besar
	Mudah	Sulit	Mudah	Sulit		
< 100	81	252	44	110	187	70

*) Disarikan dari Pustaka 13

lahan, lempung akan mempersulit proses pemisahan kontaminan karena kontaminan cenderung terikat pada tanah lempung ini.

Kandungan zat-zat lain selain minyak bumi di dalam tanah juga akan mempengaruhi unjuk kerja proses remediasinya. Logam berat yang tinggi (>2500 ppm) serta zat-zat organik yang mengandung klor (pestisida, herbisida, dan lain-lain) akan menghambat aktifitas mikroba karena sifat racun terhadap mikroba tersebut.

Penanggulangan masalah kandungan zat-zat yang bersifat racun terhadap mikroorganisme ini adalah dengan menurunkan kadarnya dengan cara mencampur menggunakan tanah bersih. Di sisi lain, pencampuran dengan tanah bersih akan menurunkan populasi mikroba pendegradasi minyak. Walaupun mikroba pendegradasi minyak sudah banyak diproduksi di pasaran, namun perlu diingat dengan penambahan mikroba ini tentunya biaya operasi proses remediasi akan menjadi lebih besar. Selain itu, mikroba yang ditawarkan yang mungkin cocok untuk kondisi tertentu, aktivitas mikrobiologisnya belum tentu sesuai dengan kondisi setempat.

b. Karakteristik Zat Pencemar

Bila akan dilakukan remediasi dengan teknik *landfarming*, maka konsentrasi minyak yang tinggi perlu dipertimbangkan karena dapat menghambat pertumbuhan mikroba di dalam tanah. Perlu diingat, konsentrasi optimum minyak bumi di dalam tanah agar proses biodegradasi dapat berjalan dengan baik adalah maksimum 10%, bahkan beberapa percobaan menyebutkan maksimum 5%.

Dengan kondisi yang ideal, maka teknik *landfarming* dapat menghilangkan kontaminan minyak bumi dengan cara mendegradasi komponen hidrokarbon minyak. Sementara teknik remediasi

Tabel 2
Faktor karakteristik tanah dan penggunaan lahan dalam memilih teknologi remediasi yang akan digunakan

Faktor	Teknik Remediasi		
	Landfarming	Desorpsi Termal	Cuci Lahan
Jenis Tanah <ul style="list-style-type: none"> ▪ Tanah berpasir ▪ Tanah endapan (<i>silt</i>) ▪ Tanah berlempung (<i>clay</i>) 	Baik untuk proses	Baik untuk proses	Baik untuk proses
	Tidak berpengaruh terhadap proses	Menghambat proses, menambah biaya	Baik untuk proses
	Menghambat proses, menambah biaya	Menghambat proses, menambah biaya	Menghambat proses, menambah biaya
Kandungan zat-zat kimia di dalam tanah <ul style="list-style-type: none"> ▪ Padatan terlarut (garam) ▪ Metal ▪ Klorin-organik, herbisida, pestisida, dll. 	Kandungan garam yang tinggi akan memperlambat proses	Tidak berpengaruh terhadap proses	Tidak berpengaruh terhadap proses
	Konsentrasi logam berat >2500 ppm dapat menghambat pertumbuhan mikroba	Tidak berpengaruh terhadap proses	Tidak berpengaruh terhadap proses
	Dapat memberikan efek racun terhadap mikroorganisme	Tidak berpengaruh terhadap proses	Tidak berpengaruh terhadap proses
Keperluan Lahan	Memerlukan lahan yang cukup luas	-	-
Pembuangan Residu	-	perlu	perlu
Pengolahan limbah cair	Perlu, bilamana terjadi <i>leaching</i>	tidak perlu	sangat perlu
Pengelolaan emisi gas	perlu	perlu	-

lainnya hanya menghilangkan atau memindahkan kontaminan saja. Akan tetapi perlu diingat bahwa tidak semua komponen hidrokarbon minyak bumi dapat mengalami biodegradasi.

Struktur kimia dari hidrokarbon minyak bumi akan menentukan kecepatan biodegradasinya. Hidrokarbon parafinik dengan rantai lurus dan hidrokarbon

mono-aromatik dengan jumlah atom karbon kurang dari sembilan akan sangat mudah terdegradasi. Semakin kompleks struktur molekul hidrokarbon akan semakin sulit mengalami biodegradasi. Hidrokarbon parafinik dengan rantai bercabang serta hidrokarbon poliaromatik, akan sukar terdegradasi. Sebagai contoh, minyak bumi Duri yang bersifat aromatik

Tabel 3
Karakteristik kontaminan dan variabel proses yang berpengaruh pada biaya operasional

Faktor	Teknik Remediasi		
	Landfarming	Desorpsi Termal	Cuci Lahan
Karakteristik kontaminan:			
▪ Konsentrasi minyak bumi	Konsentrasi optimum minyak bumi 5-10%.	Tidak terbatas	Tidak terbatas
▪ Jenis dan keadaan minyak bumi	Mendistruksi atau mendegradasi hidrokarbon yang tidak bersifat rekalsitran. Keefektifannya ditentukan oleh banyak variabel proses.	Menghilangkan semua jenis minyak bumi	Menghilangkan sebagian minyak bumi. Keefektifannya ditentukan oleh sifat larutan pengestrak atau larutan pencuci -
▪ Temperatur	Temperatur optimum 15-35 C	90 - 320 °C	-
▪ Nutrien	Perbandingan C:N:P sangat mempengaruhi	-	-
▪ Oksigen	Kekurangan oksigen akan memperlambat proses degradasi minyak bumi	-	-
▪ pH	pH optimum 6-8. Diluar pH optimum ini akan menghambat aktifitas mikroba	Tidak ada pengaruh pH	pH berpengaruh pada keefektifan larutan pencuci
▪ Populasi Mikroorganisme	Populasi mikroorganisme sebaiknya >1000 koloni/gram	-	-
▪ Kandungan air	40 - 85 % dari kapasitas penahan air tanah, atau 12 -30 % (berat)	Untuk LTTD, kandungan air optimal antara 10 - 25 %	Bukan faktor penentu, karena digunakan larutan pencuci berbasis air

tentu akan lebih sukar terdegradasi dibanding dengan minyak bumi Minas yang bersifat parafinik. Dengan keadaan semacam ini maka tujuan pembersihan lahan mungkin tidak dapat tercapai secara maksimal.

c. Variabel Proses

Biaya operasional juga akan bertambah dengan bertambahnya variabel proses yang selama berlangsungnya proses remediasi perlu dilakukan pengaturan. Beberapa variabel proses ini antara lain adalah:

Temperatur

Pada landfarming, temperatur merupakan variabel proses yang sangat menentukan, karena pertumbuhan bakteri merupakan fungsi dari temperatur. Aktifitas mikroba akan menurun pada suhu rendah dibawah 10°C dan di atas 45°C.

Temperatur tanah akan sangat dipengaruhi oleh temperatur ambien. Oleh sebab itu, kecepatan biodegradasi minyak bumi selama proses landfarming yang berlangsung selama sekitar 8 hingga 12 bulan, akan sangat tergantung dari musim. Pengaruh temperatur ini harus menjadi pertimbangan biaya yang matang dalam menjalankan remediasi dengan teknik landfarming.

Pada desorpsi termal, temperatur juga merupakan parameter kunci yang akan menentukan keberhasilan proses peng-uapan minyak bumi dari dalam tanah. Variabel temperatur ini bukan saja akan tergantung dari jenis kontaminan minyak, tetapi juga ditentukan oleh kandungan air, kapasitas panas tanah, dan besar butir partikel tanah. Sementara perpindahan panas dan kemampuan pencampuran tanah akan tergantung dari karakteristik dari unit desorbernya. Oleh sebab itu, variabel proses ini perlu diperhitungkan untuk menentukan biaya operasionalnya.

Pada remediasi cuci lahan, secara teoritis bila temperatur dinaikkan akan memudahkan proses pencuciannya. Namun karena cuci lahan menggunakan biosurfaktan atau surfaktan sintesis, kenaikan temperatur tidak serta merta dapat menambah keefektifan proses pencuciannya. Jenis dan dosis surfaktan merupakan “resep” dari vendor yang perlu diperhitungkan biayanya.

pH Tanah

pH tanah dapat berpengaruh pada kelarutan kontaminan dan aktifitas biologis. Di samping itu, pada

pH yang ekstrim (<2 dan >12) dapat mengakibatkan kerusakan peralatan proses.

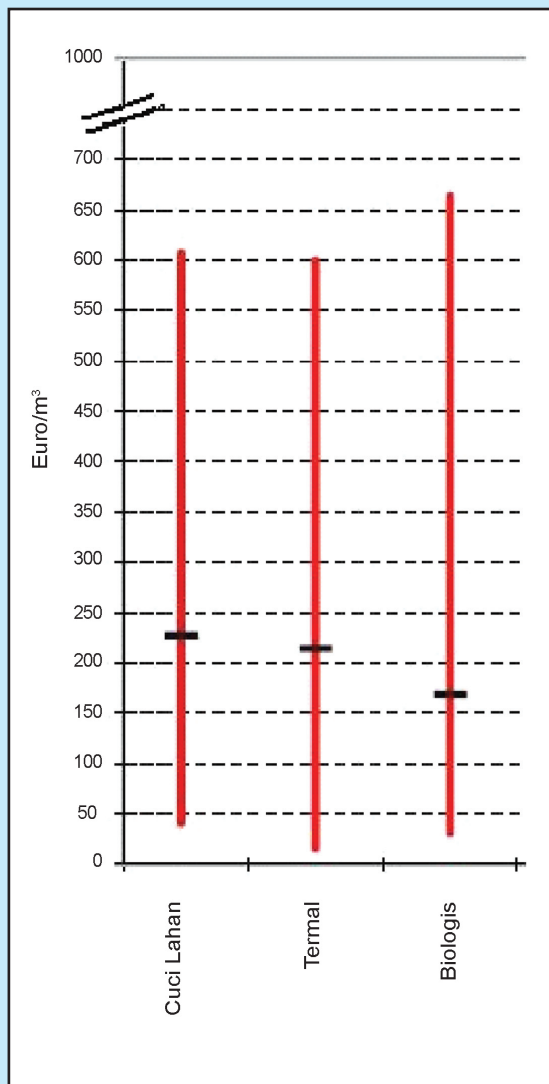
pH tanah akan sangat berpengaruh pada landfarming. Agar bakteri dapat tumbuh dengan baik maka pH tanah harus berkisar antara 6 hingga 8. Tanah dengan pH di luar batas pH ini memerlukan pengaturan pH sebelum dan selama proses remediasi berlangsung. pH tanah dapat dinaikkan dengan kapur, sementara untuk menurunkan pH dapat digunakan unsur belerang. Dalam hal ini biaya remediasi perlu mempertimbangkan penambahan bahan-bahan kimia ini.

Demikian pula halnya pada remediasi melalui cuci lahan pH akan mempengaruhi sifat pelarutan larutan pencuci terhadap minyak bumi. Larutan surfaktan akan lebih efektif pada pH alkalis (hingga pH 12) karena dapat mengakibatkan ikatan kontaminan dan tanah menjadi mudah terlepas⁽¹⁷⁾. pH juga akan mempengaruhi unjuk kerja surfaktan yang digunakan sebagai larutan pencuci. Jenis dan konsentrasi surfaktan dalam kapasitasnya melarutkan minyak bumi akan sangat tergantung dari faktor pH ini. Dengan sendirinya kecepatan ekstraksi akan berpengaruh pada biaya operasinya.

Upaya lain untuk membandingkan biaya remediasi adalah melalui studi statistik dengan mengumpulkan data remediasi yang telah dilakukan pada kurun waktu tertentu. Misalnya sebagaimana yang telah dilakukan oleh Summersgill⁽¹⁸⁾. Dia telah mengumpulkan data tentang biaya remediasi yang dilakukan pada kurun waktu 2001-2003 di negara-negara Eropa.

Data yang ditulis oleh Summersgill itu berasal dari partisipasi para regulator, konsultan, dan kontraktor di Eropa yang tergabung dalam NICOLE (*Network of Industrially-Contaminated Land owners*). Sebanyak 34 teknologi remediasi yang dipakai di 11 negara anggota menghasilkan sekitar 300-an data biaya. Pada Gambar 4 dicantumkan perbandingan biaya dari ketiga teknik remediasi yang dicuplik dari hasil studi yang telah dilakukan oleh Summersgill di Eropa tersebut.

Pada Gambar 4 hanya diambil tiga teknik remediasi saja sebagaimana yang telah disebutkan pada pendahuluan tulisan ini. Data pada Gambar 4 menunjukkan harga-harga minimum hingga maksimum yang dapat dirata-ratakan (dalam satuan Euro/m³). Biaya minimum cuci lahan adalah 30, maksimum



Gambar 4
Perbandingan biaya dari hasil Survey⁽¹⁸⁾

adalah 608 dan rata-rata adalah 226. Sementara remediasi dengan cara termal (min, max, rata-rata) adalah 15, 600, 229, dan remediasi dengan cara biologi adalah 20, 665, 167.

Cara termal menduduki biaya minimum terendah (15 Euro/m³) di antara ketiga teknik remediasi ini. Hal ini tidaklah mengherankan karena bilamana karakteristik tanah dan karakteristik kontaminan memang dalam keadaan yang sangat sesuai sehingga memudahkan untuk dilakukan remediasi dengan teknik desorpsi termal (lihat Tabel 1). Teknik remediasi desorpsi termal mempunyai keunggulan dalam hal waktu kerja yang digunakannya paling singkat.

Waktu kerja yang singkat ini dengan sendirinya akan mengurangi biaya tenaga kerja.

Dari pembahasan tentang biaya remediasi di atas, maka dapat diutarakan bahwa biaya dasar dapat dipakai hanya sebagai langkah pertama untuk membandingkan teknik remediasi yang akan digunakan. Langkah ini dapat memberikan informasi awal tentang teknik remediasi yang diperkirakan lebih murah.

Pada kondisi yang ideal, biaya dasar mungkin tidak akan jauh berbeda dengan biaya di lapangan. Namun yang sering terjadi adalah bahwa kenyataan di lapangan memerlukan perubahan rancang bangun sesuai kondisi lahan yang ada.

Biaya satuan sebagaimana dicantumkan pada Tabel 1 hanya menyebutkan biaya remediasi per satuan volume tanah. Biaya ini tidak menyebutkan jumlah atau konsentrasi kontaminan yang diolah dan berapa prosentase kontaminan yang dapat dihilangkan. Di samping itu, biaya tersebut juga tidak menyebutkan luasan lahan yang dapat digarap dengan teknik remediasi itu. Demikian pula halnya peralatan proses serta waktu yang diperlukan untuk kegiatan remediasi sering tidak diinformasikan.

Evaluasi biaya di lapangan merupakan proses berulang. Dengan memperhatikan berbagai faktor kondisi lapangan sebagaimana diuraikan di atas, pada akhirnya semakin banyak variabel yang dibandingkan, akan semakin banyak perbedaan biaya dengan yang diperkirakan pada awal seleksi dari beberapa teknik remediasi tersebut.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Sebagai kesimpulan dapat diutarakan hal-hal sebagai berikut:

- Umumnya, biaya untuk remediasi tanah tercemar hanya disebutkan biaya dasar yang menyebutkan harga satuan per volume tanah saja. Biaya ini tidak akan akurat untuk digunakan sebagai bahan perbandingan biaya antara satu teknik remediasi dengan teknik remediasi lainnya.
- Berbagai faktor, terutama karakteristik tanah, karakteristik kontaminan, dan variabel proses, akan mempengaruhi biaya sebenarnya yang akan diimplementasikan di lapangan sehingga biaya ini akan bisa jauh berbeda dengan biaya dasar tersebut.

- c. Perbandingan biaya teknik remediasi dapat pula dilakukan melalui pengumpulan data biaya-biaya remediasi yang telah dilakukan dengan berbagai teknik remediasi tanah. Untuk ini diperlukan data yang cukup banyak dari berbagai aplikasi remediasi lahan yang telah dilakukan.
- d. Perbandingan biaya teknik remediasi beserta faktor-faktor yang mempengaruhinya akan sangat berguna bagi pengguna jasa remediasi tanah untuk menentukan teknik remediasi yang efektif, murah, dan sesuai dengan kondisi lahannya.

B. Saran

Untuk memudahkan perbandingan biaya dari berbagai teknik remediasi dengan berbagai variabelnya, disarankan kepada regulator lingkungan, dalam hal ini Kementerian Negara Lingkungan Hidup, menyusun pedoman teknik remediasi lainnya sebagaimana yang telah diterbitkan untuk teknik remediasi secara biologis.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada DR. M. Mulyono, M.Sc., pengajar Teknik Remediasi, Jurusan Teknik Lingkungan, FALTL, Universitas Trisakti, Jakarta, yang telah memberikan masukan kepada penulis.

KEPUSTAKAAN

1. **Anonymous**, 2001, A Citizen's Guide to Soil Washing, EPA 542-F-01-008, Office of Solid Waste and Emergency Response (5102G), United States Environmental Protection Agency, USA.
2. **Anonymous**, 2001, A Citizen's Guide to Thermal Desorption, EPA 542-F-01-003, Office of Solid Waste and Emergency Response (5102G), United States Environmental Protection Agency, USA.
3. **Ayen, R.J., Palmer, C.R., and Swanstrom, C.P.**, 1994, Thermal Desorption, In: Hazardous Waste Site Soil Remediation, Theory and Application of Innovative Technologies (Wilson, D.J. and Clark, A.N., editors), Marcel Dekker, Inc., New York, pp. 265-310.
4. **Anonymous**, 2003, Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor: 128 Tahun 2003 tentang Tatacara dan Persyaratan Teknis Pengolahan Limbah Minyak Bumi dan Tanah Terkontaminasi oleh Minyak Bumi Secara Biologis .
5. **Anonymous**, 1994, Assessment and Remediation of Contaminated Sediments (ARCS) Program, EPA-905-B94-003 (Remediation Guidance Document): Chapter 7, United States Environmental Protection Agency, USA.
6. **Anonymous**, 2004, How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Sites, A Guide for Corrective Action Plan Reviewers, EPA 510-R-04-002, Chapter VI, Low-Temperature Thermal Desorption, Solid Waste and Emergency Response 5401G, United States Environmental Protection Agency, USA.
7. **Anonymous**, 2004, How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Sites, A Guide for Corrective Action Plan Reviewers, EPA 510-R-04-002, Chapter V Landfarming, Solid Waste and Emergency Response 5401G, United States Environmental Protection Agency, USA.
8. **Anonymous**, 1997, Comparing Costs of Remediation Technologies, Innovations in Ground Water and Soil Cleanup: From Concept to Commercialization (Preface by: P.S.C. Rao), NATIONAL ACADEMY PRESS 2101 Constitution Avenue, N.W. Washington, DC 20418, pp. 252-271, <http://www.nap.edu>.
9. **Anonymous**, 2005, Federal Remediation Technologies Roundtable, USA, <http://www.frtr.gov/>
10. **Bhandari, A. , Novak, J.T., and Dove, D.C.**, 2005, Effect of Soil Washing on Petroleum Hydrocarbon Distribution on Sand Surfaces, Journal of Hazardous Substance Research, Vol. 2, No. 7, pp. 1-13. Hazardous Substance Research Center, The Great Plains/Rocky Mountain, USA, <http://www.engg.ksu.edu/hsrc/JHSR>.
11. **Eweis, J.B., Ergas, S.J., Chang, D.P.Y., and Schroeder, E.D.**, 1998, Bioremediation Principles, p17, McGraw-Hill, New York,` USA
12. **Griffiths, Richard A.**, 1995, Soil-washing technology and practice, Journal of Hazardous Materials 40, ELSEVIER, pp. 175-189.
13. **Mulyono, M.**, 2006, Kajian Teknologi Remediasi Untuk Pengelolaan Lingkungan Kegiatan Migas, Laporan Riset DIPA, Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Minyak dan Gas Bumi "LEMIGAS", Jakarta.

14. **Pearl, M., Pruijn, M., and Bovendeur, J.**, 2006, The application of soil washing to the remediation of contaminated soils, *Land Contamination & Reclamation*, 14 (3), EPP Publications Ltd.
15. **Urum, K. and Pekdemir, T.**, 2004, Evaluation of biosurfactants for crude oil contaminated soil washing, *Chemosphere* 57, pp 1139–1150.
16. **Suthersan, S.S.**, 1997, *Remediation Engineering Design Concepts*, CRC Lewis Publishers, New York, USA, p 1.
17. **SUMMERSGILL, M.**, 2006, *Remediation Technology Costs in the UK & Europe; Drivers and Changes from 2001 to 2005*, VHE Technology, BARNSELY, UK; now Managing Partner, SEnSe Associates LLP, MAIDSTONE, UK.
18. **Zhanga , L., Somasundaraan, P., Ososkovb, V., and Chou, C.C.**, *Flotation of Hydrophobic Contaminants from Soil, Colloids and Surfaces, A: Physicochemical and Engineering Aspects* 177, ELSEVIER, pp. 235-246.