

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II.1. Pengertian dan Karakteristik Minyak Bumi

Minyak Bumi adalah hasil proses alami berupa hidrokarbon yang dalam kondisi tekanan dan temperatur atmosfer berupa fasa cair atau padat, termasuk aspal, lilin mineral, atau ozokerit, dan bitumin yang diperoleh dari proses penambangan, tetapi tidak termasuk batu bara atau endapan hidrokarbon lain yang berbentuk padat yang diperoleh dari kegiatan yang tidak berkaitan dengan kegiatan usaha dan minyak bumi (Kep MenLH Nomor 128 Tahun 2003).

Minyak bumi merupakan campuran kompleks senyawa organik yang terdiri atas senyawa hidrokarbon dan nonhidrokarbon yang berasal dari sisa-sisa mikroorganisme, tumbuhan, dan binatang yang tertimbun selama berjuta-juta tahun. Kandungan senyawa hidrokarbon dalam minyak bumi lebih dari 90% dan sisanya merupakan senyawa nonhidrokarbon seperti sulfur, nitrogen, oksigen dalam kadar yang bervariasi, volatilitas, *specific gravity*, dan viskositas yang beragam (Speight, 1991).

Crude oil dan produk *petroleum* merupakan campuran yang sangat kompleks dan bervariasi dari ribuan komponen individual yang memiliki beragam sifat fisik. Memahami komposisi ini penting untuk dapat mengetahui kelakuan tumpahan minyak dan pilihan respon yang sesuai (Zhu *et al.*, 2001).

Senyawa hidrokarbon merupakan senyawa organik yang terdiri atas karbon dan hidrogen. Hidrokarbon merupakan salah satu kontaminan yang dapat berdampak buruk baik bagi manusia maupun lingkungan. Minyak bumi dan turunannya merupakan salah satu contoh dari hidrokarbon yang banyak digunakan oleh manusia dan berpotensi mencemari lingkungan (Notodarmojo, 2005).

Speight (1991) menyebutkan bahwa komposisi dari minyak bumi adalah sebagai berikut:

Carbon, 83 – 87%

Hydrogen, 10 – 14%

Nitrogen, 0,1 – 2%

Oxygen, 0,05 – 1,5%

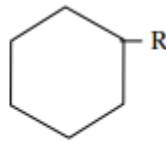
Sulfur, 0,005 – 6%

Speight (1991) juga membagi komponen hidrokarbon dalam minyak bumi menjadi tiga kelas, yaitu:

1. Paraffins : *saturated hydrocarbons* dengan rantai lurus atau bercabang, namun tanpa struktur cincin.
2. Naphthenes : *saturated hydrocarbons* yang memiliki satu atau lebih cincin, dimana masing-masing cincin memiliki satu atau lebih gugus rantai *paraffinic* (lebih dikenal sebagai *alicyclic hydrocarbons*).



Alkylcyclopentane



alkylcyclohexane

3. Aromatics : hidrokarbon yang mengandung satu atau lebih inti aromatic, seperti sistem cincin *benzene*, *naphthalene*, dan *phenantherene* yang dihubungkan dengan disubstitusi cincin *naphthalene* dan/atau gugus rantai *paraffinic*.

II.2. Limbah Minyak Bumi sebagai Limbah B3

PP No. 101 Tahun 2014 Tentang Pengelolaan Limbah B3 mendefinisikan limbah B3 adalah sisa suatu usaha dan/atau kegiatan yang mengandung bahan berbahaya dan/atau beracun, yang karena sifat, konsentrasi, dan/atau jumlahnya, baik secara langsung maupun tidak langsung, dapat mencemarkan dan/atau merusak lingkungan hidup, dan/atau membahayakan lingkungan hidup, kesehatan, serta kelangsungan hidup manusia dan makhluk hidup lain.

Limbah dikategorikan sebagai limbah berbahaya jika menunjukkan salah satu atau lebih dari empat karakteristik berikut (Dutta, 2002):

a. Mudah terbakar

Untuk memperjelasnya dengan mudah, limbah dianggap *ignitable* (dapat menyala) jika sampel yang representatif mampu – pada temperatur dan tekanan standar – terbakar akibat gesekan, penyerapan kelembaban atau perubahan bahan kimia secara mendadak dan pada saat terbakar, pembakaran sangat besar dan terus menerus sehingga menyebabkan bahaya.

b. Korosif

Limbah dikatakan dapat menunjukkan sifat korosif jika sampel yang representatif berbentuk cair di alam dan memiliki pH kurang dari atau sama dengan 2 atau lebih besar dari atau sama dengan 12,5 atau jika dapat merusak baja dengan kecepatan melebihi 6,35 mm (0,25 inch) per tahun pada temperatur uji 55°C (130°F) yang ditentukan dengan metode pengujian standar.

c. Reaktif

Karakteristik limbah reaktif dapat diperlihatkan jika sampel representatif dari limbah umumnya tidak stabil dan siap mengalami perubahan besar seperti bereaksi dengan kasar membentuk campuran yang dapat meledak jika dicampur dengan air atau sianida atau sulfida yang mendorong limbah terarah ke pH yang sangat rendah (2,0) atau tinggi (12,5) sehingga menimbulkan gas-gas beracun/asap dalam jumlah cukup untuk membahayakan kesehatan manusia atau lingkungan. Limbah juga dapat dikategorikan reaktif jika sampel yang representatif mampu meledak atau mampu mendekomposisi bahan peledak atau mampu bereaksi pada temperatur dan tekanan standar.

d. Beracun

Limbah memperlihatkan karakteristik beracun jika sampel yang representatif dari limbah mengandung kontaminan beracun pada

konsentrasi yang cukup untuk mengancam kesehatan manusia atau lingkungan.

KEPMENLH No. 128 Tahun 2003 tentang Tatacara dan Persyaratan Teknis Pengolahan Limbah Minyak Bumi dan Tanah Terkontaminasi oleh Minyak Bumi Secara Biologis mendefinisikan limbah minyak bumi sebagai sisa atau residu minyak yang terbentuk dari proses pengumpulan dan pengendapan kontaminan minyak yang terdiri atas kontaminan yang sudah ada di dalam minyak, maupun kontaminan yang terkumpul dan terbentuk dalam penanganan suatu proses dan tidak dapat digunakan kembali dalam proses produksi. Dalam lampiran 1 PP 101 tahun 2014 tentang Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun, limbah minyak bumi tergolong kedalam limbah yang berpotensi sebagai limbah B3 dengan katagori bahaya 1 yang berdampak akut dan langsung terhadap manusia dan dapat dipastikan akan berdampak penting terhadap lingkungan hidup, baik limbah minyak yang berasal dari industri eksplorasi minyak, gas, dan panas bumi; industri kilang minyak dan gas bumi; maupun kegiatan industri petrokimia yang menghasilkan produk organik dari proses pemecahan fraksi minyak bumi termasuk produk turunan yang dihasilkan langsung dari produk dasarnya.

Limbah minyak bumi yang dihasilkan usaha atau kegiatan minyak, gas dan panas bumi atau kegiatan lain yang menghasilkan limbah minyak bumi merupakan limbah bahan berbahaya dan beracun yang memiliki potensi menimbulkan pencemaran dan atau kerusakan lingkungan. Limbah minyak terdiri atas bermacam-macam senyawa, di antaranya berupa hidrokarbon ringan, hidrokarbon berat, pelumas, dan bahan ikutan dalam hidrokarbon (Shaheen, 1992).

Pada umumnya, limbah minyak bumi pada kegiatan usaha minyak dan gas bumi atau kegiatan lain bersumber dari (PP No 101 Tahun 2014):

1. Proses pemurnian dan pengilangan minyak bumi menghasilkan gas atau LPG, naptha, avigas, avtur, gasoline, minyak tanah atau kerosin, minyak solar, minyak diesel, minyak bakar atau bensin, residu, pelarut (*solvent*), *wax*, *lubricant* dan aspal.

2. Proses pembuatan minyak pelumas, oli dan gemuk yang berbahan dasar minyak.
3. Proses pengolahan minyak bumi.
4. Pembersihan *heat exchanger*.
5. Tanki penyimpanan minyak dan gas bumi.

Jenis limbah minyak bumi berdasarkan sumber limbahnya terurai menjadi (PP No 101 Tahun 2014):

1. *Sludge* dari proses produksi fasilitas penyimpanan minyak bumi, yang meliputi:
 - a. *Sludge* kilang minyak primer dari hasil pemisahan gravitasi minyak, air dan padatan selama penyimpanan dan/atau pengolahan. *Sludge* tersebut termasuk yang dihasilkan dalam pemisahan minyak, air, dan padatan pada tangki dan *impoundments*, saluran air dan alat angkut lainnya, genangan air, dan unit *stormwater* menerima aliran air hujan atau air hasil proses pengolahan, pemeliharaan dan/atau produksi.
 - b. *Sludge* kilang minyak sekunder (emulsi) hasil pemisahan fisik dan/atau kimia minyak, air dan padatan.
2. Residu dasar tanki.
3. *Slop* padatan emulsi minyak dari industri penyulingan minyak bumi.
4. Katalis bekas.
5. Filter bekas termasuk lempung (*clays*) *spent filter*.

Menurut Dutta (2002), minyak bumi merupakan salah satu sumber pencemar lahan yang sangat sering terjadi. Lahan yang terkontaminasi minyak bumi umumnya seperti lapangan pesawat terbang, ruang pembakaran, tempat pembuangan bahan kimia, sedimen laut yang tercemar, sumur pembuangan, tempat lindi, area pelatihan pemadam kebakaran, hangar/area perawatan pesawat terbang, lubang *landfill* dan pembuangan, tangki penyimpanan, tempat pelarutan pelumas, *surface impoundments*, dan tempat perawatan mesin.

Limbah minyak yang berasal dari minyak mentah (*crude oil*) terdiri dari ribuan konstituen pembentuk yang secara struktur kimia dapat dibagi menjadi lima golongan, yaitu (Dhamar, 2005):

- a. Hidrokarbon jenuh (*saturated hydrocarbons*), merupakan kelompok minyak yang dicirikan dengan adanya rantai atom karbon (bercabang atau tidak bercabang atau membentuk siklik) berikatan dengan atom hidrogen, dan merupakan rantai atom jenuh (tidak memiliki ikatan ganda).
- b. Aromatik (*Aromatics*). Famili minyak ini adalah kelas hidrokarbon dengan karakteristik cincin yang tersusun dari enam atom karbon. Jumlah relative hidrokarbon aromatik didalam minyak mentah bervariasi dari 10-30 %.
- c. *Asphalten* dan resin. Selain empat komponen utama penyusun minyak tersebut di atas, minyak juga dikarakterisasikan oleh adanya komponen-komponen lain seperti aspal (*asphalt*) dan resin (5-20 %) yang merupakan komponen berat dengan struktur kimia yang kompleks berupa siklik aromatik terkondensasi dengan lebih dari lima *ring aromatic* dan *naphthoaromatik* dengan gugus-gugus fungsional sehingga senyawa-senyawa tersebut memiliki polaritas yang tinggi.
- d. Komponen non-hidrokarbon. Kelompok senyawa non-hidrokarbon terdapat dalam jumlah yang relatif kecil, kecuali untuk jenis petrol berat (*heavy crude*).
- e. Porphyrine. Senyawa ini berasal dari degradasi klorofil yang berbentuk kompleks Vanadium (V) dan Nikel (Ni).

Crude oil juga mengandung sejumlah senyawa non hidrokarbon, terutama senyawa sulfur, senyawa organik metalik dalam jumlah kecil/*trace* sebagai larutan dan garam-garam anorganik sebagai suspensi koloidal, yaitu antara lain (Dhamar, 2005):

- a. Senyawa sulfur

Crude oil yang densitasnya lebih tinggi mempunyai kandungan sulfur yang lebih tinggi pula. Keberadaan sulfur dalam minyak bumi sering

banyak menimbulkan akibat, misalnya dalam gasoline dapat menyebabkan korosi (khususnya dalam keadaan dingin atau berair), karena terbentuknya asam yang dihasilkan dari oksida sulfur (sebagai hasil pembakaran gasoline) dan air.

b. Senyawa oksigen

Kandungan total oksigen dalam minyak bumi adalah kurang dari 2% dan menaik apabila produk itu lama berhubungan dengan udara. Oksigen dalam minyak bumi berada dalam bentuk ikatan sebagai asam karboksilat, keton, ester, eter, anhidria, senyawa monosiklo dan disiklo dan phenol. Sebagai asam karboksilat berupa asam Naphthenat (asam alisiklik) dan asam alifatik.

c. Senyawa nitrogen

Umumnya kandungan nitrogen dalam minyak bumi sangat rendah, yaitu 0,1-0,9%. Kandungan tertinggi terdapat pada tipe asphaltik. Nitrogen mempunyai sifat racun terhadap katalis dan dapat membentuk gum/getah pada *fuel oil*. Kandungan nitrogen terbanyak terdapat pada fraksi titik didih tinggi. Nitrogen kelas dasar yang mempunyai berat molekul yang relatif rendah dapat diekstrak dengan asam mineral encer, sedangkan yang mempunyai berat molekul yang tinggi dapat diekstrak dengan asam mineral encer.

d. Konstituen metalik

Minyak mentah juga mengandung konstituen metalik seperti besi, tembaga, terutama nikel dan vanadium.

II.3. Bioremediasi

Dalam lampiran KEPMENLH No. 128 Tahun 2003 disebutkan bahwa pengolahan dengan metode biologis merupakan salah satu alternatif teknologi pengelolaan minyak bumi dengan memanfaatkan makhluk hidup khususnya mikroorganisme untuk menurunkan konsentrasi atau daya racun bahan pencemar.

Bioremediasi merupakan alternatif pengolahan limbah minyak bumi dengan cara degradasi oleh mikroorganisme yang menghasilkan senyawa

akhir yang stabil dan tidak beracun. Proses degradasi relatif murah, efektif, dan ramah lingkungan. Namun metode ini membutuhkan waktu yang lebih lama dibandingkan dengan cara fisika atau kimia (Eweis *et al.*, 1998).

Kebutuhan remediasi lahan tercemar membangkitkan pengembangan teknologi baru yang ditekankan pada detoksifikasi dan penghancuran kontaminan. Bioremediasi memanfaatkan proses mikroorganisme untuk mendetoks atau mendegradasi kontaminan di lingkungan. Walaupun bioremediasi dipandang sebagai teknologi yang baru, namun mikroorganisme telah digunakan secara rutin untuk pengolahan dan transformasi limbah paling tidak selama 100 tahun (Baker dan Herson, 1994).

Lampiran KEPMENLH No. 128 Tahun 2003 menyebutkan bahwa bioremediasi adalah proses pengolahan limbah minyak bumi yang sudah lama atau tumpahan/ceceran minyak pada lahan terkontaminasi dengan memanfaatkan makhluk hidup termasuk mikroorganisme, tumbuhan atau organisme lain untuk mengurangi konsentrasi atau menghilangkan daya racun bahan pencemar.

Menurut Dutta (2002), bioremediasi adalah teknologi pengolahan yang menggunakan biodegradasi kontaminan organik melalui simulasi populasi mikroba asli dengan menyediakan beberapa faktor pendukung, seperti menambahkan oksigen, membatasi nutrisi, atau menambahkan spesies mikroba asing. Teknologi secara spesifik telah terbagi menjadi dua katagori besar, yaitu: (1) teknologi *ex situ* (misalnya *slurry phase*, *land treatment*, *solid phase*, dan *composting*), dan (2) teknologi *in situ*.

Dutta (2002) menjabarkan beberapa kunci utama dalam bioremediasi, yaitu:

1. Kebanyakan teknologi pengolahan bioremediasi menghancurkan kontaminan dan struktur tanah.
2. Teknologi pengolahan ini umumnya dirancang untuk mengurangi toksisitas baik dengan menghancurkan maupun mengubah kandungan zat beracun menjadi komponen dengan racun yang lebih rendah.
3. Mikroorganisme asli, termasuk bakteri dan fungi, merupakan mikroorganisme yang paling banyak digunakan. Pada beberapa kasus, limbah dapat diinokulasi dengan bakteri khusus atau jamur yang diketahui dapat

mendegradasi kontaminan yang dipermasalahkan. Tanaman juga dapat digunakan untuk meningkatkan biodegradasi dan stabilitas tanah.

4. Penambahan nutrisi atau reseptor elektron (seperti hidrogen peroksida atau ozon) untuk meningkatkan pertumbuhan dan reproduksi organisme asli yang dibutuhkan.
5. Aplikasi bioremediasi di lapangan diantaranya adalah penggalian, penanganan tanah, penyimpanan lapisan tanah tercemar, pencampuran tanah tercemar, aerasi tanah tercemar, injeksi fluida, ekstraksi fluida, dan pengenalan terhadap nutrisi dan substrat.

Cookson (1995) menjelaskan beberapa faktor yang diperlukan proses biologi dalam mendegradasi kontaminan, yaitu antara lain:

1. Keberadaan mikroorganisme pendegradasi kontaminan
2. Keberadaan substrat yang menjadi sumber karbon
3. Keberadaan *inducer* yang dapat mendorong pembentukan enzim spesifik
4. Keberadaan sistem akseptor-donor elektron
5. Kondisi lingkungan yang mendukung reaksi katalisis enzim
6. Nutrien yang menunjang pertumbuhan bakteri dan produksi enzim
7. Kisaran temperatur yang mendukung aktivitas mikrobadan reaksi katalisis
8. Tidak adanya material/substansi yang bersifat toksik terhadap mikroorganisme pendegradasi
9. Keberadaan organisme yang dapat mendegradasi produk metabolit
10. Keberadaan organisme yang dapat mencegah terbentuknya senyawa toksik
11. Kondisi lingkungan yang dapat meminimasi organisme kompetitif yang berkaitan dengan keberlangsungan reaksi.

Cookson (1995) juga menjelaskan keunggulan dan kelemahan teknologi bioremediasi dalam pengolahan kontaminan, yaitu:

Tabel 2.1. Keunggulan dan Kelemahan Teknologi Bioremediasi

Kelebihan	Kelemahan
<ul style="list-style-type: none">▪ Dapat dilakukan <i>on site</i> (di lokasi tercemar)▪ Permanen menghilangkan limbah▪ Lebih murah▪ Ramah lingkungan▪ Tidak ada resiko jangka panjang▪ Perusakan lokasi rendah▪ Tanpa biaya transport▪ Dapat digabungkan dengan teknologi lainnya.	<ul style="list-style-type: none">▪ Tidak semua senyawa kimia dapat dibioremediasi▪ Memerlukan monitoring yang ketat▪ Memerlukan karakteristik <i>site</i> yang spesifik▪ Memerlukan penelitian intensif▪ Potensial menghasilkan produk sampingan yang belum diketahui▪ Ada persepsi teknologi yang belum terbukti

Sumber: Cookson, 1995

Sasaran setiap upaya bioremediasi adalah untuk mengurangi potensi toksisitas kontaminan di lingkungan dengan memanfaatkan mikroba untuk mentransformasikan, mendegradasi, maupun imobilisasi toksikan. Dengan mengintegrasikan kemampuan degradasi mikroba dengan desain rekayasa yang menciptakan lingkungan yang optimal untuk pertumbuhan, bioremediasi diharapkan akan dapat berhasil di lapangan (Sunarko, 2001).

II.4. Mikroorganisme Pendegradasi Hidrokarbon

Proses degradasi hidrokarbon oleh mikroorganisme bergantung pada aktivitas mikroorganisme pendegradasi. Degradasi material organik di lingkungan alami umumnya dilakukan oleh dua kelompok mikroorganisme, yaitu bakteri dan jamur. Bakteri mewakili beragam jenis organisme prokariotik yang banyak tersebar di biosfer. Bakteri dapat ditemukan di semua lingkungan dimana terdapat organisme yang hidup, namun hal ini tidak berarti bahwa semua strain bakteri ada di seluruh alam (Baker dan Herson, 1994).

Baker dan herson (1994) juga menyatakan bahwa bakteri berukuran kecil (umumnya antara 1 dan 10 um) dan memiliki morfologi yang sederhana, tidak memiliki organ membran dalam tertutup yang biasanya dimiliki oleh organisme eukariotik seperti jamur, protozoa, alga, tumbuhan, dan hewan. Akan tetapi, secara biokimia bakteri menunjukkan metabolisme yang baik sehingga bakteri dapat dimanfaatkan untuk keperluan tertentu. Pertumbuhan dan metabolisme yang cepat, plastisitas genetik, dan kemampuan untuk menyesuaikan diri dengan cepat di lingkungan yang berbeda-beda juga merupakan faktor-faktor yang mendukung proses bioremediasi.

Pada lingkungan yang telah lama tercemar serta kolam pengolahan limbah dimungkinkan terdapat bakteri pendegradasi minyak/lemak tersebut secara alamiah, bersaing maupun berkonsorsia dengan mikroorganisme lainnya (Suyasa, 2007).

Keberhasilan biodegradasi minyak bumi tergantung pada keefektifan dan kualitas mikroba serta kondisi lingkungannya. Mikroba yang sesuai adalah mikroba yang memiliki kemampuan fisiologi dan metabolik untuk mendegradasi pencemar. Dalam beberapa hal, pada lingkungan yang akan dilakukan bioproses sudah terdapat mikroba. Namun untuk mendapatkan bioproses yang lebih baik perlu ditambahkan mikroba dari luar yang lebih sesuai sehingga yang aktif dalam bioproses adalah kultur campuran (Noegroho, 1999).

Suyasa (2007) menyatakan bahwa pengendalian pencemaran dengan mikroba tengah berkembang dan memiliki potensi di masa mendatang karena teknologinya yang ramah lingkungan, antara lain melalui pengurangan penggunaan bahan kimia yang berpotensi menimbulkan pencemaran bau.

Mikroorganisme yang memiliki kemampuan untuk mendegradasi *petroleum hydrocarbon* dan komponen serupa lainnya banyak terdapat di habitat laut, air tawar, dan tanah. Lebih dari 200 spesies bakteri, ragi, dan jamur terbukti dapat mendegradasi hidrokarbon mulai dari metana sampai komponen dengan lebih dari 40 atom karbon (Zhu *et al.*, 2001).

Lasari (2010) menyatakan bahwa bakteri yang mampu mendegradasi senyawa yang terdapat di dalam hidrokarbon minyak bumi disebut bakteri

hidrokarbonoklastik. Bakteri ini mampu mendegradasi senyawa hidrokarbon dengan memanfaatkan senyawa tersebut sebagai sumber karbon dan energi yang diperlukan bagi pertumbuhannya. Bakteri yang tergolong ke dalam bakteri hidrokarbonoklastik diantaranya adalah *Pseudomonas*, *Arthrobacter*, *Alcaligenes*, *Brevibacterium*, *Brevibacillus*, dan *Bacillus*. Bakteri-bakteri tersebut banyak tersebar di alam, termasuk dalam perairan atau sedimen yang tercemar oleh minyak bumi atau hidrokarbon. Kita dapat mengisolasi bakteri hidrokarbonoklastik tersebut dari alam dan mengkulturkannya, selanjutnya kita bisa menggunakannya sebagai pengurai limbah minyak bumi yang efektif dan efisien, serta ramah lingkungan.

Banyak penelitian saat ini diarahkan untuk mencari mikroba dari alam yang mempunyai kemampuan menarik dalam kaitannya dengan kinetika degradasi polutan, jangkauan senyawa-senyawa polutan yang dapat didegradasi, dan lingkungan yang tepat untuk aktivitas degradasi mikroba (Sunarko, 2001).

II.5. Faktor Pembatas Bioremediasi

Sunarko (2001) menyatakan bahwa berbagai isolat dan konsorsium mikroba mampu mentransformasikan atau mendegradasi berbagai macam polutan lingkungan. Namun seringkali proses tersebut berlangsung terlalu lama untuk menurunkan konsentrasi kontaminan secara signifikan, akibat adanya batasan biologis, kimiawi, maupun fisik. Tanpa memperhatikan karakter teknologi pengolahan secara terperinci, seluruh teknik bioremediasi memerlukan mikroorganisme yang tepat di lokasi yang tepat dengan kondisi lingkungan yang tepat agar bioremediasi dapat terjadi dengan baik (Baker dan Herson, 1994).

Proses penguraian senyawa-senyawa pencemar oleh bakteri (mikroba) dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti jumlah nutrient, kecukupan oksigen, serta faktor-faktor lain seperti suhu, pH, dan lingkungan matrik tumbuh) (Suyasa, 2007).

a. Nutrisi

Saat tumpahan minyak yang cukup besar terjadi di lingkungan, suplai karbon meningkat secara dramatis dan keberadaan nitrogen dan fosfor

berada pada batas minimum untuk degradasi minyak (Atlas, 2009). Olivieri et al. (1976 dalam Zhu et al., 2001) menemukan bahwa biodegradasi *crude oil* meningkat tajam dengan penambahan paraffin yang dilapisi $MgNH_4PO_4$.

b. Oksigen

Proses biodegradasi yang terjadi pada senyawa hidrokarbon membutuhkan akseptor elektron seperti oksigen, nitrat, dan sulfat. Oksigen merupakan unsur yang sangat penting (Cooney, 1984). Kekurangan oksigen menyebabkan degradasi menurun tajam. Degradasi akan terjadi pada laju tertinggi jika aerasi dimaksimalkan (Santosa, 1999).

c. pH

pH tanah umumnya stabil bersifat alkali. Kebanyakan bakteri dan jamur heterotrof menyukai pH netral, dengan jamur lebih toleran terhadap kondisi asam. Biodegradasi minyak dapat terhambat akibat penurunan pH secara drastis (Zhu et al., 2001). Menurut *Department of Energy and the Petroleum Environmental U.S* (2002) range pH yang baik untuk bakteri adalah 6,5-8,5 dan pH optimal untuk biodegradasi berkisar antara 6 – 8,5.

d. Temperatur

Proses biologis umumnya meningkat seiring dengan meningkatnya temperatur sampai temperatur maksimal dimana terjadi denaturasi enzim yang akan menghambat dan mematikan sel. Biasanya, reaksi terhadap suhu oleh mikroorganisme ditunjukkan dengan pola asimetris yang jelas, dengan aktivitas maksimal pada suhu tepat di bawah suhu letal. Mikroorganisme diklasifikasikan ke dalam golongan *psychrophiles* (suhu optimal antara 5 dan 15°C), *mesophiles* (suhu optimal antara 25 dan 40°C), atau *thermophiles* (suhu optimal antara 40 dan 60°C) (Baker dan Herson, 1994).

Walaupun sebagian besar proyek bioremediasi dilaksanakan pada kondisi mesofil, kemampuan untuk mendegradasi kontaminan juga ditemukan pada mikroorganisme *psychrophiles* dan *thermophiles* (Atlas, 1988). Contohnya strain *Corynebacterium* yang diisolasi dari tanah

terkontaminasi minyak di Antartika menunjukkan kemampuan untuk mendegradasi hidrokarbon pada suhu 1°C (Kerry, 1993). Di sisi lain, William et al. (1988) pernah mendemonstrasikan mikroorganisme *thermophiles* dapat mendegradasi bahan peledak pada sistem operasi tanah kompos pada suhu 55°C (Baker dan Herson, 1994).

Laju degradasi tertinggi biasanya terjadi pada suhu antara 30 – 40°C pada lingkungan tanah, 20 sampai 30°C pada beberapa lingkungan perairan, dan 15 sampai 20°C pada lingkungan pantai (Bossert dan Bartha, 1984).

e. Kadar air

Baker dan Herson (1994) menyatakan bahwa bakteri seperti sel yang bergantung pada suplai air yang cukup untuk dapat tumbuh dan bereproduksi. Menurut *Departement of Energy and the Petroleum Environmental U.S* (2002), kadar air yang baik untuk pertumbuhan bakteri adalah antara 50 – 80% dari *water holding capacity*.

II.6. Bioremediasi dengan Penambahan Kompos

Banyak penelitian lapangan mengenai bioremediasi dengan penambahan nutrien organik, khususnya yang bersumber dari kompos menunjukkan hasil yang lebih efektif dalam menangani pencemaran dari minyak bumi. Hanya saja dalam prosesnya, kondisi dan komposisi penambahan nutrient yang paling optimal masih belum ditemukan. Kebanyakan mereka menyatakan bahwa jenis dan konsentrasi nutrient yang optimal sangat bervariasi tergantung properti minyak dan kondisi lingkungan (Venosa dan Zhu, 2003).

Atagana, (2008) yang melakukan penelitian bioremediasi hidrokarbon terhadap pencemaran tanah dengan pupuk organik, menunjukkan bahwa pupuk organik (pupuk kandang) yang dilengkapi dengan inokulasi secara efektif dapat menurunkan kandungan hidrokarbon yang tercemar di tanah dalam waktu empat bulan dengan penurunan yang fluktuatif setiap bulannya. Hal ini terjadi karena aktivitas pemotongan rantai hidrokarbon yang dilakukan oleh mikroba tidak merata, hanya mikroorganisme heterotropik yang mampu beradaptasi dan

berkembang. Mikroorganismenya mampu berkembang pada kondisi bertemperatur tinggi yang dihasilkan oleh pupuk organik (pupuk kandang).

Sutherland et al. (1995) dalam Atagana, (2008) melakukan penelitian studi efek pemberian nutrient organik pada biodegradasi tanah yang terkontaminasi minyak mentah selama tujuh bulan. Hasil studi menunjukkan bahwa penambahan nutrient organik (terutama pupuk kandang ayam 90 g) akan lebih meningkatkan pemanfaatan hidrokarbon dimana nutrient organik berfungsi sebagai suplemen tambahan.

Setyowati (2008) melakukan studi penurunan *Total Petroleum Hydrocarbon (TPH)* pada *oil sludge* dengan *composting bioremediation* menunjukkan besarnya penurunan konsentrasi *TPH* pada *oil sludge* setelah dilakukan bioremediasi dengan menggunakan kompos daun angkana dan glodogan selama 8 minggu adalah 95,76%.

Penelitian lainnya dilakukan oleh Munawar (2007) yang meneliti pengaruh penambahan nutrient organik pada bioremediasi tumpahan minyak mentah (*crude oil*) dengan metode biostimulasi di lingkungan Pantai Surabaya Timur. Dalam waktu 30 hari, bioremediasi dengan metode ini menurunkan konsentrasi hidrokarbon sampai dengan 88,25%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa bahan organik memberikan indikasi yang baik untuk digunakan sebagai sumber nutrient.

Berikut ini adalah beberapa penelitian lainnya mengenai bioremediasi dengan menggunakan kompos.

Tabel 2.2. Hasil Penelitian yang dilakukan oleh Peneliti Pendahulu mengenai Penurunan *TPH* pada Proses Bioremediasi

Nama Peneliti	Judul Penelitian	Hasil Penelitian
Ester (2003)	Pengaruh pH Awal Tanah pada Proses Pemulihan Tanah Terkontaminasi Minyak Bumi dengan Teknik	Setelah 120 hari, efisiensi penurunan <i>TPH</i> dalam kisaran 75-85% dengan pH tanah 6 serta penambahan <i>chicken</i>

Nama Peneliti	Judul Penelitian	Hasil Penelitian
	Bioremediasi Menggunakan Konsorsium Bakteri dan Jamur <i>Sporotrichum pulverulentum</i> dengan <i>Chicken Manure</i> sebagai Sumber Nutrien.	<i>manure</i> dan kompos sebanyak 1%.
Setyowati (2008)	Studi Penurunan <i>Total Petroleum Hydrocarbon (TPH)</i> Pada <i>Oil Sludge</i> dengan <i>Composting Bioremediation</i> .	Besarnya penurunan konsentrasi <i>TPH</i> pada <i>oil sludge</i> setelah dilakukan bioremediasi dengan menggunakan kompos daun angsana dan glodogan selama 8 minggu adalah 95,76%
Mujab (2011)	Penggunaan Biokompos dalam Bioremediasi Lahan Tercemar Limbah Lumpur Minyak Bumi.	Proses degradasi senyawa hidrokarbon hidrokarbon yang paling optimum ditunjukkan oleh reaktor C2 dengan perlakuan 100 gram berat kering lumpur minyak bumi, 100 gram berat kering biokompos, 9 gram urea, dan rasio C/N = 5 dengan tingkat degradasi <i>TPH</i> sebesar 91,15%.

II.7. Total Petroleum Hydrocarbon (TPH)

Total Petroleum Hydrocarbon (TPH) adalah istilah yang digunakan untuk menggambarkan ratusan bahan kimia yang secara alami muncul dari *crude oil*. *Crude oil* digunakan untuk membuat produk *petroleum*, yang dapat mengontaminasi lingkungan. Dikarenakan begitu banyaknya bahan kimia yang berbeda-beda di dalam *crude oil* dan produk *petroleum* lainnya, tidak dilakukan pengukuran masing-masing kandungan secara terpisah. Oleh karena itu pengukuran yang dilakukan di lapangan adalah jumlah *Total Petroleum Hydrocarbon (TPH)* (Agency for Toxic Substance and Disease Registry, 1999).

Agency for Toxic Substance and Disease Registry (1999) juga menyatakan bahwa *TPH* adalah campuran bahan kimia, namun sebagian besarnya berasal dari hidrogen dan karbon, sehingga disebut hidrokarbon. Para ilmuwan membagi *TPH* ke dalam kelompok *petroleum hydrocarbon* yang serupa pada tanah atau air. Kelompok ini dinamakan *petroleum hydrocarbon fractions*. Setiap fraksi mengandung banyak bahan kimia. Beberapa kandungan bahan kimia yang terdapat di *TPH* adalah *hexane*, *jet fuel*, *mineral oils*, *benzene*, *toluene*, *xylenes*, *naphtalane*, dan *florene*, seperti halnya kandungan produk *petroleum* dan bensin lainnya.