

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Kondisi Umum Wonocolo

Desa Wonocolo memiliki sumber daya alam berupa tambang minyak bumi dan gas alam atau energi yang melimpah, namun demikian tidak secara otomatis meningkatkan kekayaan atau kemakmuran warganya, karena yang mampu menambang bukanlah orang pribumi melainkan warga Negara asing. Masyarakat pribumi hanya diberi tugas sebagai pekerja kasar atau buruh pertambangan semua hasil dari pertambangan yang ditambang oleh masyarakat sekitar diserahkan kepada Pertamina (Naumi, 2015).

Menurut Naumi (2015) dampak penambangan dan pengolahan minyak memang memiliki dampak positif dalam pembangunan negara dan pendapatan warga masyarakat Desa Wonocolo, tetapi dampak negatif lain juga ditimbulkan dalam kegiatan penambangan tradisional yakni terjadinya pencemaran lingkungan yang diakibatkan dari berbagailogam. Pencemaran yang diakibatkan dengan adanya pertambangan di Desa Wonocolo dapat berupa pencemaran air, pencemaran tanah dan bahkan pencemaran udara di sekitar lingkungan karena aktivitas pengolahan dan penambangan minyak.

Perubahan yang terjadi setelah adanya penambangan mempengaruhi kehidupan sosial ekonomi masyarakat, tetapi pengaruh yang ditimbulkan ada pengaruh negatif dan pengaruh positif, atau dapat dikatakan bahwasanya adanya kegiatan pertambangan minyak tidak hanya memberi keuntungan bagi masyarakat, tetapi juga menimbulkan masalah masalah yang umumnya dialami oleh masyarakat. Permasalahan yang ditimbulkan dapat berupa adanya konflik pemanfaatan tempat pengalihan sumur, konflik sosial dalam masyarakat, permasalahan limbah dan aktivitas kesehatan masyarakat.

Pengelolaan sumur minyak tua di Wonocolo, belum sesuai dengan ketentuan yang ada dan akan berdampak pada lingkungan. Lubang-lubang sumur yang ditinggalkan, dibiarkan menganga. Di sekitar lubang, tanah tercemar lumpur berwarna hitam, sisa-sisa minyak. drum-drum bekas, mesin, dan menara kayu yang menghitam, teronggok tak terurus. Asap yang keluar dari tungku-tungku

penyulingan membuat udara makin pekat dan panas. Serta bau minyak tetap meleasak ke lubang hidung. Air sungai yang mengalir dikaki pebukitan, berwarna kekuningan, kental dan bau minyak. Demikian itu merupakan limbah dari proses penyulingan minyak yang tidak dikelola dengan baik yang berakibat dapat menimbulkan masalah seperti keselamatan tenaga kerja yang tidak terjamin dan berbahaya bagi lingkungan sekitarnya maupun hutan (Adi, 2017).

Menurut Adi (2017), penambangan minyak mentah/lantung dengan cara menimba, dalam keadaan terbuka dapat menimbulkan kebakaran di samping mengganggu pertumbuhan kayu jati muda di sekitar lokasi penambangan, wilayah desa tersebut merupakan wilayah kerja Perum Perhutani untuk menanam kayu jati, keselamatan kepada para pekerja tidak terjamin, maka untuk pengelolaan obyek wisata Sumur Tua Wonocolo agar selalu peduli terkait dengan perlindungan lingkungan dan juga selalu menjaga keselamatan pekerja dalam pengelolaan sumur maupun dalam menjalankan bisnis pariwisata yang diharapkan selalu memperhatikan, Undang-Undang No. 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup dan Undang Undang No. 13 Tahun 2003 tentang Keselamatan dan Kesehatan Kerja.

2.2. Limbah Minyak Mentah

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:

- 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. Aspalten 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 dalam Wulandari, 2016):

a. Senyawa sulfur

Crude oil yang densitasnya lebih tinggi mempunyai kandungan sulfur yang lebih tinggi pula. Keberadaan sulfur dalam minyak bumi sering 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 (Dhamar, 2005 dalam Wulandari, 2016)

2.3. Akibat Pencemaran Limbah Minyak Mentah

Menurut Sulistyono (2012) pencemaran minyak didalam air dapat terjadi karena adanya kegiatan eksplorasi minyak bumi, pengilangan minyak bumi kecelakaan transportasi atau kebocoran pipa. Cemarannya minyak ini dapat bermuara di sungai, danau atau air tanah yang berakibat buruk pada kesehatan manusia maupun makhluk hidup lain karena penurunan kualitas air baku air minum.. Minyak di air dapat berupa minyak terapung dipermukaan, terdispersi secara mekanik, teremulsi, terlarut (ukuran droplet < 5 mm), dan minyak yang melekat pada permukaan partikel (Nuryatini dan Edi, 2010).

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 (Wulandari, 2016)

2.4. Fitoremediasi

Fitoremediasi adalah sebuah teknologi yang menggunakan berbagai tanaman untuk menurunkan, mengekstrak atau menghilangkan kontaminan-kontaminan dari tanah dan air. Konsep mengolah air limbah dengan menggunakan media tanaman atau lebih populer disebut fitoremediasi telah lama dikenal oleh manusia, bahkan digunakan juga untuk mengolah limbah Bahan Bercun Berbahaya (B3) atau limbah radioaktif (Subroto, 1996). Hal serupa juga dikemukakan oleh Moenir (2010) (dalam Caroline & Guido 2015) fitoremediasi didefinisikan sebagai penggunaan tanaman atau tumbuhan untuk menyerap, mendegradasi, menghilangkan, menstabilkan atau menghancurkan bahan pencemar khususnya logam berat maupun senyawa organik lainnya.

Fitoremediasi dapat dilakukan secara in situ (langsung ditempat terjadinya pencemaran) maupun ex situ atau menggunakan kolam buatan yang merupakan bioreaktor besar untuk penanganan air limbah. Proses fitoremediasi tidak membutuhkan biaya besar dan secara estetik dapat mendukung upaya

penghijauan lingkungan, sehingga fitoremediasi menjadi pilihan yang tepat pada pengolahan limbah (Subroto, 1996).

Menurut Santriyana (2015) (dalam Caroline & Guido, 2015) mengemukakan bahwa dalam penelitian fitoremediasi di lapangan ada beberapa persyaratan bagi tanaman yang akan digunakan dalam penelitian tersebut. Tidak semua jenis tanaman dapat digunakan karena tidak semua tanaman dapat melakukan metabolisme, volatilisasi dan akumulasi semua polutan dengan mekanisme yang sama.

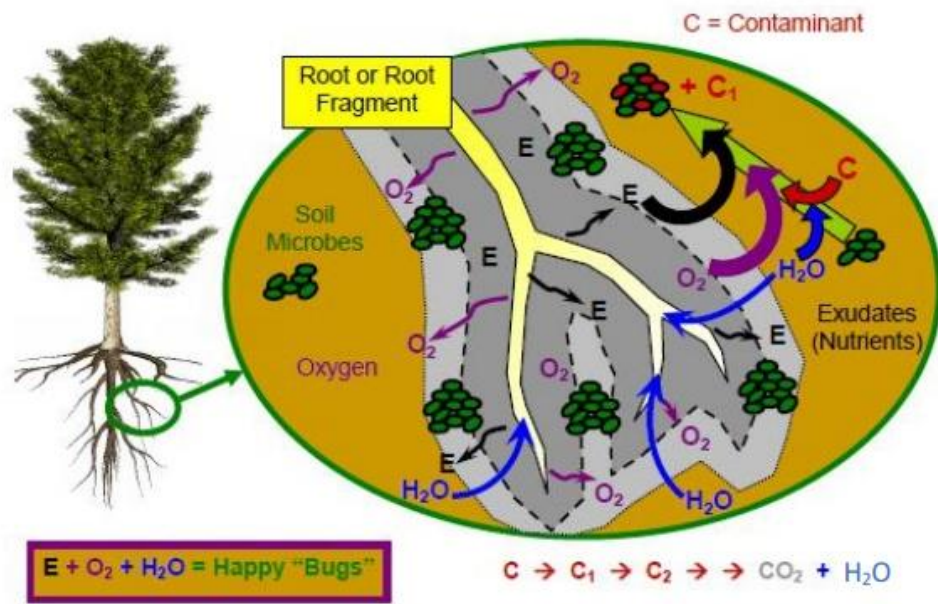
Mekanisme kerja fitoremediasi antara lain :

1. Fitoekstraksi adalah penyerapan logam berat oleh akar tanaman dan mengakumulasi logam berat tersebut ke bagian-bagian tanaman seperti akar, batang dan daun.



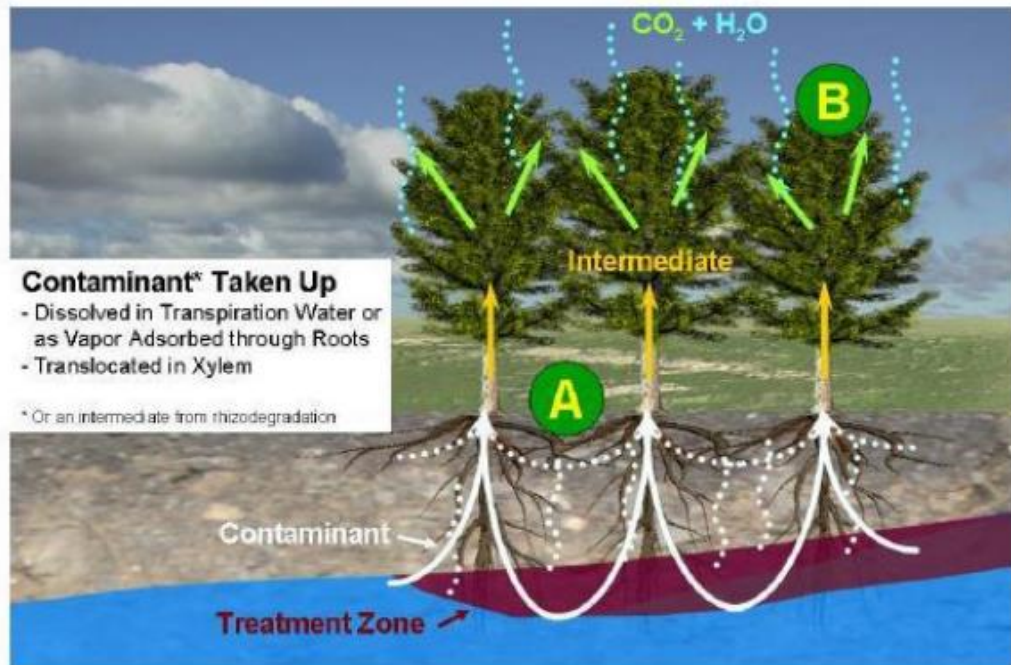
Gambar 2.1. Proses Fitoekstraksi
(Sumber ITRC, 2009)

2. Rhizofiltrasi adalah pemanfaatan kemampuan akar tanaman untuk menyerap, mengendapkan, mengakumulasi logam berat dari aliran limbah.



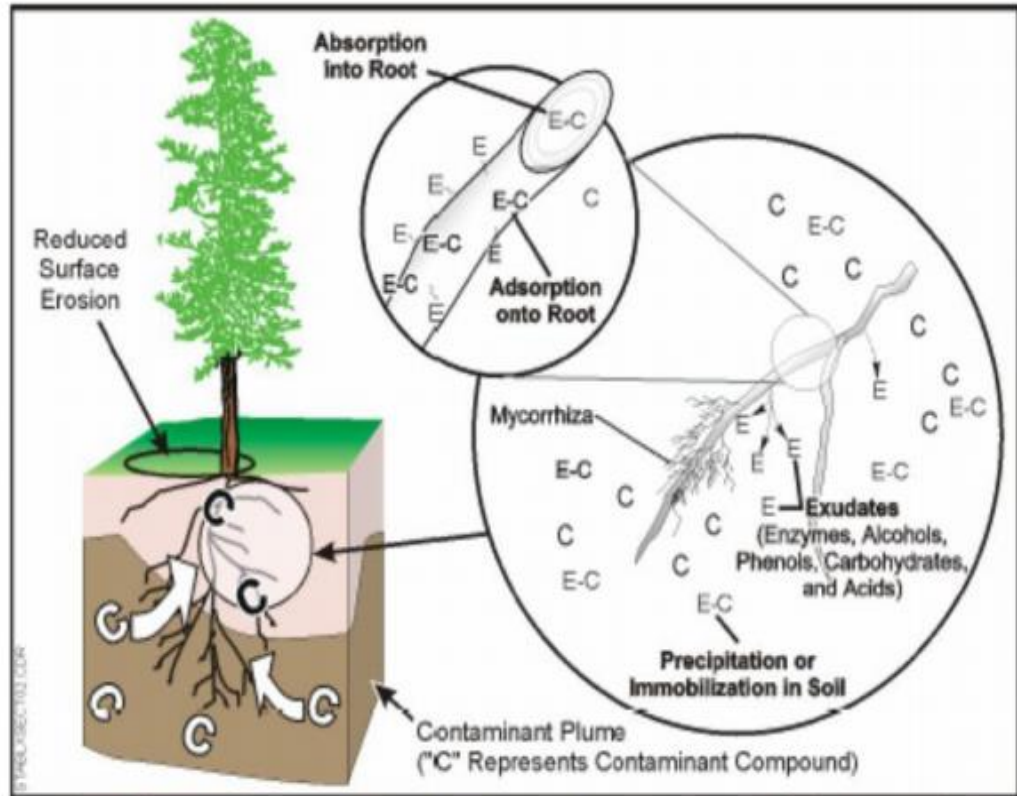
Gambar 2.2. Proses Rhizofiltrasi
(Sumber ITRC, 2009)

3. Fitodegradasi adalah metabolisme logam berat di dalam jaringan tanaman oleh enzim seperti dehalogenase dan oksigenase.



Gambar 2.3. Proses Fitodegradasi
(Sumber ITRC, 2009)

4. Fitostabilisasi adalah kemampuan tanaman dalam mengekresikan (mengeluarkan) suatu senyawa kimia tertentu untuk mengimobilisasi logam berat di daerah rizosfer (perakaran).



Gambar 2.4. Proses Fitostabilisasi
(Sumber ITRC, 2009)

5. Fitovolatilisasi terjadi ketika tanaman menyerap logam berat dan melepaskannya ke udara lewat daun dan ada kalanya logam berat mengalami degradasi terlebih dahulu sebelum dilepas lewat daun.

Fitriyah, 2013 dalam (Caroline & Guido, 2015)



Gambar 2.5. Proses Fitovolatilisasi
 (Sumber ITRC, 2009)

Keuntungan fitoremediasi dikemukakan oleh Santriyana (2015) (dalam Caroline & Guido 2015) adalah dapat bekerja pada senyawa organik dan anorganik, prosesnya dapat dilakukan secara insitu dan eksitu, mudah diterapkan dan tidak memerlukan biaya yang tinggi, teknologi yang ramah lingkungan dan bersifat estetik bagi lingkungan, serta dapat mereduksi kontaminan dalam jumlah yang besar. Sedangkan kerugian fitoremediasi ini adalah prosesnya memerlukan waktu lama, bergantung kepada keadaan iklim, dapat menyebabkan terjadinya akumulasi logam berat pada jaringan dan biomasa tumbuhan, dan dapat mempengaruhi keseimbangan rantai makanan pada ekosistem.

2.5. Eceng Gondok

Eceng gondok adalah tanaman air yang memiliki keunggulan dalam kegiatan fotosintesis, penyediaan oksigen dan penyerapan sinar matahari. Bagian dinding permukaan akar, batang dan daunnya memiliki lapisan yang sangat peka sehingga pada kedalaman yang ekstrem sampai 8 meter di bawah permukaan air masih mampu menyerap sinar matahari serta zat-zat yang larut di bawah permukaan air. Akar, batang, dan daunnya juga memiliki kantung-kantung udara sehingga mampu mengapung di air. Keunggulan lain dari eceng gondok adalah

dapat menyerap senyawa nitrogen dan fosfor dari air yang tercemar, berpotensi untuk digunakan sebagai komponen utama pembersih air limbah dari berbagai industri dan rumah tangga. Karena kemampuannya yang besar, tanaman ini diteliti oleh NASA untuk digunakan sebagai tanaman pembersih air di pesawat ruang angkasa (Ratnani dkk., 2011). Menurut Zimmel (2005) (dalam Ratnani dkk., 2011) eceng gondok juga dapat digunakan untuk menurunkan konsentrasi COD dari air limbah.



Gambar 2.6. Tanaman Eceng Gondok
(Sumber: Antiserangga.com)

Tumbuhan *Eichhornia crassipes* merupakan tumbuhan air yang memiliki kemampuan dalam menstabilkan lingkungan perairan yang tercemar oleh berbagai zat pencemar perairan. Tumbuhan air memiliki kemampuan secara umum untuk mensupport komponen-komponen tertentu di dalam perairan, dan hal tersebut sangat bermanfaat dalam proses pengolahan limbah cair (Tosepu R., 2012). Eceng gondok (*Eichhornia crassipes*) merupakan tumbuhan akuatik yang secara teroris dapat menyerap air dan unsur yang terdapat didalamnya sehingga dapat digunakan sebagai bioindikator dalam penyebaran radionuklida dan depolutan pada limbah radiaktif (Setiawati, 2004).

Eceng gondok dapat hidup mengapung bebas di atas permukaan air dan berakar di dasar kolam atau rawa jika airnya dangkal. Kemampuan tumbuhan

inilah yang banyak digunakan untuk mengolah air buangan, karena dengan aktivitas tumbuhan ini mampu mengolah air buangan domestik dengan tingkat efisiensi yang tinggi. Eceng gondok dapat menurunkan kadar BOD dan partikel tersuspensilainnya secara biokimiawi serta mampu menyerap logam – logam berat seperti Cr, Pb, Hg, Cd, Cu, Fe, Mn, Zn dengan baik. Kemampuan dalam menyerap logam berat, eceng gondok umur muda lebih tinggi dibandingkan umur tua (Widyanto, 1977).

Berdasarkan hasil penelitian Masittha (2015), Eceng gondok terbukti efektif dapat digunakan untuk proses penurunan kadar COD dan BOD pada limbah cair industri kembang gula lunak. Penurunan kadar COD dan BOD dengan nilai absorbansi mengalami penurunan yang terbaik pada sampel III yaitu pemberian eceng gondok dengan konsentrasi 2000gr/100L dengan nilai COD dan BOD sebesar 0 mg/L pada lama waktu penanaman eceng gondok selama 15 hari.

Menurut Alfarokhi (2016) dalam penelitiannya yang bertujuan untuk mengetahui efisiensi tumbuhan eceng gondok (*Eichhornia crassipes*) dalam menurun kadar COD dan TSS dengan variasi massa 0,5 kg, 1 kg, dan 1,5 kg diperoleh hasil bahwa penurunan kadar COD dan TSS pada limbah tambak udang vannamei yang paling besar terjadi pada kolam fitoremediasi dengan variasi massa 1,5 kg yaitu sebesar 60,39% dari kadar COD awal. Dari data tersebut juga ditarik kesimpulan bahwa semakin banyak jumlah tumbuhan eceng gondok (*Eichhornia crassipes*) semakin cepat juga dalam menurunkan kadar COD pada air limbah. Eceng gondok juga mampu meremoval TPH (Total Petroleum Hidrokarbon) hingga 77% pada konsentrasi minyak pelumas terbesar yaitu 1.750 mg/L (Ratna, 2007 dalam Yuliani, 2019).

Salah satu fungsi ekologis dari tanaman eceng gondok adalah sebagai stabilisator suatu perairan karena kemampuannya dalam menetralsir bahan pencemar yang ada pada perairan. Eceng gondok mengabsorbsi bahan pencemar melalui akar, batang, umbi dan daunnya. Saat terjadinya proses absorpsi bahan pencemar, eceng gondok bersimbiosis dengan mikroorganisme. Efisiensi penyerapan eceng gondok semakin berkurang jika suatu bahan pencemar bereaksi dengan bahan pencemar lain membentuk senyawa baru. Tanaman ini sangat berpotensi bila dikelola dan dikontrol dengan baik untuk dimanfaatkan

sebagai biofiltrasi. Namun perlu diperhatikan kepadatan dari enceng gondok, sebab dapat menimbulkan dampak negatif apabila seluruh permukaan air tertutup oleh enceng gondok. Dampak negatif tersebut antara lain berkurangnya difusi oksigen dari udara ke dalam perairan (Yuliani, 2019)

2.6. Aquatic Plant Treatment

Prinsip dasar *Aquatic Plant* adalah dengan memanfaatkan aktivitas mikroorganisme dalam tanah dan tanaman pada area tersebut. Secara tidak langsung tanaman berperan penting dalam mendukung kehidupan mikroorganisme pengurai limbah seperti bakteri, jamur, alga dan protozoa. Batang, cabang, daun dan akar tanaman akuatik menyediakan kebutuhan oksigen untuk mikroorganisme, habitat bagi tempat hidup dan berkembangnya mikroorganisme. Tanaman akuatik juga disebut tanaman *hidrophytic* atau *hydrophytes* tanaman yang telah disesuaikan untuk tinggal pada lingkungan perairan. Tanaman akuatik dikelompokkan menjadi beberapa kelompok, yaitu tumbuh di bawah permukaan air, mencuat, maupun terapung di atas permukaan air. Dalam pemilihan jenis tanaman akuatik, produksi biomassa, tingkat pertumbuhan dan kemudahan pengolahan dan panen harus diperhatikan (Bruce, 1992 dalam Putra, 2018).

Tanaman akuatik mempunyai peran yang tidak langsung tetapi sangat penting dalam proses amonifikasi, nitrifikasi dan denitrifikasi, yaitu sebagai tempat pelengkatan mikroorganisme dan menyuplai oksigen melalui akar sehingga mendukung pertumbuhan bakteri aerob. Sisa-sisa bagian tanaman yang mati menjadi sumber karbon organik yang diperlukan oleh bakteri sebagai sumber energi dalam proses denitrifikasi, yaitu perubahan nitrat menjadi gas N_2 . Selain proses biologis, proses penghilangan senyawa nitrogen dalam *constructed wetland* juga terjadi melalui volatilisasi ion ammonium (NH_4^+) menjadi gas NH_3 bila pH lebih besar dari 8; sedimentasi dan penyaringan partikel padat yang mengandung nitrogen; serta proses adsorpsi ion ammonium ke dalam sedimen organik dan anorganik melalui pertukaran ion (Tongchai dan Udomphon, 2004).

Akar tanaman akuatik di dalam media tanah akan mengeluarkan oksigen sehingga akan terbentuk zona rhizosfer yang kaya oksigen. Zona rhizosfer ini

akan terbentuk di seluruh permukaan rambut akar, sehingga semakin besar luas permukaan akar maka zona rhizosfer yang terbentuk akan semakin besar. Oksigen akan mengalir ke akar melalui batang setelah berdifusi dari atmosfer melalui pori-pori daun. Diperkirakan oksigen yang dilepas oleh akar tanaman akuatik berkisar antara 5-45 mg tiap satu meter persegi luas permukaan akar. Tumbuhan akuatik mampu memasok oksigen ke dalam tanah di bawah permukaan air sebanyak 0,2- 10 cm³ oksigen per batang per menit (Bruce, 1992 dalam Putra 2018).

2.7. Baku Mutu Kualitas Air

Menurut PP No. 82 Tahun 2001 Tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air yang dimaksud baku mutu air adalah ukuran batas atau kadar makhluk hidup, zat, energi atau komponen yang ada atau harus ada dan unsur pencemar yang ditenggang keberadaannya di dalam air. Baku mutu air digunakan sebagai tolak ukur terjadinya pencemaran air, selain itu dapat digunakan sebagai instrumen untuk mengendalikan kegiatan yang membuang air limbahnya ke sungai agar memenuhi baku mutu yang dipersyaratkan sehingga kualitas air tetap terjaga pada kondisi alamiahnya. Dalam PP No. 82 Tahun 2001 klasifikasi mutu air digolongkan menjadi 4 (empat) kelas dimana pembagian kelas ini didasarkan pada tingkatan baiknya mutu air dan kemungkinan kegunaannya bagi suatu peruntukan. Klasifikasi mutu air tersebut yaitu :

1. Kelas satu, yaitu air yang peruntukannya dapat digunakan untuk air baku air minum dan atau peruntukan lain yang mempersyaratkan mutu air yang sama dengan kegunaan tersebut.
2. Kelas dua, yaitu air yang peruntukannya dapat digunakan untuk prasarana/sarana rekreasi air, pembudidayaan ikan air tawar, peternakan, air untuk mengairi pertanaman dan atau peruntukan lain yang sama dengan kegunaan tersebut.
3. Kelas tiga, yaitu air yang peruntukannya dapat digunakan untuk pembudidayaan ikan air tawar, peternakan, air untuk mengairi pertanaman dan peruntukan lain yang sama dengan kegunaan tersebut.

4. Kelas empat, yaitu air yang peruntukannya dapat digunakan untuk mengairi pertanaman dan atau peruntukan lain yang sama dengan kegunaan tersebut.

2.8. Baku Mutu Air Limbah bagi Usaha dan/atau Kegiatan Minyak dan Gas Serta Panas Bumi

Menurut Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup No. 19 Tahun 2010 tentang usaha dan/atau Kegiatan Minyak dan Gas serta panas bumi, parameter yang harus di amati antara lain:

Tabel 2.1. Baku Mutu Air Limbah Kegiatan Eksplorasi Dan Produksi Migas Dari Fasilitas Darat (*On Shore*) Lama.

No.	Jenis air limbah	Parameter	Kadar Maksimum
•	Air Terproduksi	COD	300 mg/L
		Minyak dan lemak	25 mg/L
		Sulfida terlarut (H ₂ S)	1 mg/L
		Amonia (NH ₃)	10 mg/L
		Phenol total	2 mg/L
		Temperatur	45 °C
		pH	8-9
		TDS	4000 mg/L
	Air Limbah Drainase	Minyak dan lemak	15 mg/L
		Karbon Organik Total	110 mg/L

Keterangan:

1. Fasilitas eksplorasi dan produksi minyak dan gas darat (*on-shore*) adalah fasilitas yang digunakan untuk kegiatan eksplorasi, pengeboran, sumur produksi, sumur injeksi, *well treatment*, dan fasilitas pengolahan minyak dan gas dari industri minyak dan gas yang berlokasi di darat, termasuk fasilitas yang memiliki sumur produksi di laut tetapi proses pemisahan minyak dan/atau gas dengan air terproduksi dilakukan di darat.
2. Fasilitas eksplorasi dan produksi minyak dan gas darat (*on-shore*) lama adalah fasilitas yang digunakan untuk kegiatan eksplorasi, pengeboran, sumur produksi, sumur injeksi, *well treatment*, dan fasilitas pengolahan minyak dan gas dari industri minyak dan gas yang telah beroperasi atau tahap perencanaannya dilakukan sebelum tahun 1996.
3. Apabila air limbah terproduksi dibuang ke laut parameter TDS tidak diberlakukan (PMPNLH, 2010).

Minyak bumi terdapat dalam pori-pori yang berada di antara batuan-batuan *sandstone* dan *limestone*. Pori-pori ini memiliki ukuran yang beragam serta selain terdapat minyak, juga gas dan air yang ditemukan dalam suatu reservoir. Oleh karena itu, dalam produksi minyak bumi dari suatu sumur minyak, gas dan air juga turut diproduksi. Apabila air diproduksi tersebut akan dibuang atau dialirkan ke suatu badan air penerima, tentunya karakteristik air tersebut harus dapat memenuhi baku mutu yang telah ditentukan. Air diproduksi berbeda-beda sehingga setiap area dapat berbeda pula unit pengolahannya. Tujuan utama pengolahan air diproduksi adalah untuk: (1) menyisahkan minyak dan lemak; (2) menyisahkan zat organik terlarut; (3) disinfeksi; (4) menyisahkan *suspended solids*; (5) menyisahkan gas terlarut; (6) desalinasi; (7) menurunkan kesadahan; (8) menyisahkan NORM (*Naturally Occurring Radioactive Materials*). Volume air diproduksi akan semakin seiring dengan bertambahnya umur sungai. Estimasi rasio antara air dan minyak secara global adalah (4:1). Dengan persyaratan tertentu, air diproduksi dapat dibuang ke lingkungan yang berarti tidak diperoleh nilai dari adanya air diproduksi tersebut. Padahal, air diproduksi adalah limbah cair terbesar yang dihasilkan oleh industri minyak dan gas (Andarani, 2015).

2.9. Pencemaran Air

BAPPEDA DKI Jakarta menerangkan bahwa pencemaran air adalah masuknya atau dimasukkannya makhluk hidup, zat, energi, dan atau komponen lainnya ke dalam air dan atau berubahnya tatanan udara oleh kegiatan manusia atau proses alam sehingga kualitas udara turun sampai ketinggian tertentu yang menyebabkan air menjadi kurang atau tidak dapat berfungsi lagi sesuai peruntukannya. Sumber pencemar air dapat berasal dari effluent industri pengolahan atau limbah cair yang masuk ke dalam air dan buangan dari kegiatan domestik rumah tangga, kantor, hotel, restoran, tempat hiburan, pasar, pertokoan dan rumah sakit. Sumber industri pengolahan yang menjadi sumber pencemaran air adalah agro-industri (peternakan), industri pengolahan makanan, industri minuman, industri tekstil, industri kulit, industri kimia dasar, industri

mineral non logam, Industri logam dasar, industri hasil olahan logam, maupun industri listrik dan gas (Setyanto & Warniningsih, 2011).

2.10. Parameter Kualitas Air

2.10.1. DO (*Dissolved Oxygen*)

Parameter oksigen terlarut dapat digunakan sebagai indikator tingkat kesegaran air sehingga oksigen memegang peranan penting sebagai indikator kualitas perairan. Hal tersebut dikarenakan oksigen terlarut berperan dalam proses oksidasi dan reduksi bahan organik dan anorganik. Karena proses oksidasi dan reduksi inilah maka peranan oksigen terlarut sangat penting untuk membantu mengurangi beban pencemaran pada perairan secara alami (Salmin, 2005).

Menurut Effendi dan Fardiaz (dalam Mahyudin, 2015) suatu perairan dapat dikatakan baik dan mempunyai tingkat pencemaran yang rendah jika kadar oksigen terlarutnya (DO) lebih besar dari 5 mg/l, sedangkan konsentrasi oksigen terlarut (DO) pada perairan yang masih alami memiliki nilai DO kurang dari 10 mg/l. Konsentrasi oksigen terlarut minimal untuk kehidupan biota tidak boleh kurang dari 6 ppm.

2.10.2. BOD (*Biochemical Oxygen Demand*)

BOD adalah jumlah oksigen terlarut yang dibutuhkan oleh bakteri pengurai untuk menguraikan bahan pencemar organik dalam air. Makin besar konsentrasi BOD suatu perairan, menunjukkan konsentrasi bahan organik di dalam air yang juga tinggi (Yudo, 2010).

Kebutuhan oksigen biologi atau Biological Oxygen Demand (BOD) adalah banyaknya oksigen yang dibutuhkan untuk merombak bahan organik dalam volume air tertentu secara biologis. Air dengan BOD tinggi menunjukkan defisiensi oksigen sehingga tidak mampu mendukung kehidupan organisme yang membutuhkan oksigen (Yudo, 2010).

BOD atau Biochemical Oxygen Demand adalah suatu jumlah oksigen terlarut yang diperlukan oleh mikroorganisme (biasanya bakteri) untuk mengurai atau mendekomposisi bahan organik dalam kondisi aerobik (Santoso, 2018).

Menurut Mays (dalam Santoso, 2018) BOD merupakan suatu ukuran jumlah oksigen yang digunakan oleh populasi mikroba yang terkandung dalam perairan sebagai respon terhadap masuknya bahan organik yang dapat diurai. Beberapa peneliti menambahkan bahwa pengertian BOD tidak hanya menyatakan jumlah oksigen, tetapi juga menyatakan jumlah bahan organik mudah urai (*biodegradable organics*) yang ada di perairan.

Metode pengukuran BOD cukup sederhana, yaitu mengukur kandungan oksigen terlarut awal (DO_i) dari sampel pada awal pengambilan sampel, kemudian mengukur kandungan oksigen terlarut kembali setelah sampel diinkubasi selama 5 hari pada kondisi gelap dan suhu tetap yang sering disebut dengan DO₅. Selisih DO_i dan DO₅ (DO_i - DO₅) merupakan nilai BOD yang dinyatakan dalam miligram oksigen per liter (mg/L). Pengukuran oksigen dapat dilakukan secara analitik dengan cara titrasi (metode Winkler, iodometri) atau dengan menggunakan alat yang disebut DO meter yang dilengkapi dengan probe khusus (Santoso, 2018).

Pengukuran BOD melibatkan mikroorganisme (bakteri) sebagai pengurai bahan organik, sehingga analisis BOD memerlukan waktu yang lama. Waktu oksidasi biokimia yang dilakukan oleh bakteri ini sangat dipengaruhi oleh suhu perairan. Pada metode standar, suhu yang digunakan pada analisis ini adalah suhu 20°C. Suhu rata-rata perairan di Indonesia 25 – 30°C sehingga hal ini akan mempengaruhi lamanya inkubasi dan aktivitas bakteri pengurai (Santoso, 2018).

Menurut Effendi dan Salmin (2005) (dalam Mahyudin, 2015) semakin besarnya konsentrasi BOD mengindikasikan bahwa perairan tersebut telah tercemar, konsentrasi BOD yang tingkat pencemarannya masih rendah dan dapat dikategorikan sebagai perairan yang baik memiliki kadar BOD berkisar antara 0 - 10 mg/l, sedangkan perairan yang memiliki konsentrasi BOD lebih dari 10 mg/l dianggap telah tercemar.

2.10.3. COD (*Chemical Oxygen Demand*)

Menurut Yudo (2010) COD adalah banyaknya oksigen yang di butuhkan untuk mengoksidasi bahan-bahan organik secara kimia. Pernyataan ini sejalan dengan pernyataan Suyasa (2007) bahwa kebutuhan oksigen kimia atau Chemical

Oxygen Demand (COD) adalah banyaknya oksigen yang dibutuhkan untuk proses oksidasi senyawa-senyawa kimia.

COD (*Chemical Oxygen Demand*) atau oksigen kimia untuk reaksi oksidasi terhadap bahan buangan didalam air, dalam hal ini bahan buangan organik akan dioksidasi oleh bahan kimia yang digunakan sebagai sumber oksigen / oxidizing agent (Susilawati, 2011).

Senyawa-senyawa organik pada umumnya tidak stabil dan mudah dioksidasi secara biologis atau kimia menjadi senyawa stabil, antara lain oksigen terlarut dalam perairan menurun dan hal ini menyebabkan permasalahan bagi kehidupan aquatik. Untuk menyatakan kandungan bahan organik dalam perairan dilakukandengan mengukur jumlah oksigen yang dibutuhkan untuk menguraikan bahan tersebut sehingga menjadi senyawa yang stabil (Wirandani, 2016).

Pengukuran COD dilakukan, karena dalam bahan organik sering ditemukan bahan-bahan yang tidak dapat terurai secara biologis dan hanya dapat diuraikan secara kimiawi. Secara umum, angka COD yang tinggi, mengindikasikan semakin besar tingkat pencemaran yang terjadi (Yudo, 2010).

Tes COD digunakan untuk menghitung kadar bahan organik yang dapat dioksidasi dengan cara menggunakan bahan kimia oksidator kuat dalam media asam. Kadar COD dalam air limbah berkurang seiring dengan berkurangnya konsentrasi bahan organik yang terdapat dalam air limbah, oleh karena itu diperlukan pengolahan yang tepat dimana dapat mengurangi baik secara kualitas dan kuantitas konsentrasi bahan organik di dalam air (Wirandani, 2016).

Menurut Boyd (dalam Santoso, 2018) COD atau Chemical Oxygen Demand adalah jumlah oksigen yang diperlukan untuk mengurai seluruh bahan organik yang terkandung dalam air. Seluruh bahan organik akan diurai karena pada pengukuran COD ini menggunakan oksidator kuat kalium bikromat pada kondisi asam dan panas dengan katalisator perak sulfat sehingga segala macam bahan organik, baik yang mudah urai maupun yang kompleks dan sulit urai, akan teroksidasi. Dengan demikian, selisih nilai antara COD dan BOD memberikan gambaran besarnya bahan organik yang sulit urai yang ada di perairan. Nilai COD menggambarkan jumlah total bahan organik yang ada.

Menurut Umaly (dalam Santoso, 2018) metode pengukuran COD sedikit lebih kompleks, karena menggunakan peralatan khusus reflux, penggunaan asam pekat, pemanasan, dan titrasi. Peralatan reflux diperlukan untuk menghindari berkurangnya air sampel karena pemanasan. Prinsipnya pengukuran COD adalah penambahan sejumlah tertentu kalium bikromat ($K_2Cr_2O_7$) sebagai oksidator pada sampel (dengan volume diketahui) yang telah ditambahkan asam pekat dan katalis perak sulfat, kemudian dipanaskan selama beberapa waktu. Selanjutnya, kelebihan kalium bikromat ditera dengan cara titrasi. Dengan demikian kalium bikromat yang terpakai untuk oksidasi bahan organik dalam sampel dapat dihitung dan nilai COD dapat ditentukan.

Metode pengukuran COD sedikit lebih kompleks disbanding BOD. Proses pengukuran COD penggunaan asam pekat, pemanasan, dan titrasi dengan memanfaatkan kalium bikromat yang terpakai untuk oksidasi bahan organik dalam sampel. Namun demikian sangat dimungkinkan dapat senyawa kompleks anorganik yang ada di perairan juga ikut teroksidasi dan dihitung menjadi nilai COD. Dengan demikian dalam kasus-kasus tertentu nilai COD mungkin sedikit 'over estimate' untuk gambaran kandungan bahan organik (Santoso, 2018). UNESCO/WHO/UNEP mengemukakan bahwa nilai COD pada perairan yang tidak tercemar biasanya kurang dari 20 mg/liter (Mahyudin, 2015).

2.10.4. Amonia (NH_3)

Amonia adalah gas tajam yang tidak berwarna (titik didih $-33,5^\circ C$). Cairan mempunyai panas penguapan yang besar ($1,37 \text{ kJ g}^{-1}$ pada titik titinya) dan dapat ditangani dengan peralatan laboratorium yang biasa (Cotton dan Wilkinson, 1989). Amonia (NH_3) termasuk gas alkalin yang tidak berwarna, lebih ringan dari udara dan punya aroma khas yang menyengat. Biasanya senyawa ini didapati berupa gas dengan bau tajam yang khas. Amonia sendiri adalah senyawa kaustik dan dapat merusak kesehatan. Kontak dengan gas amonia berkonsentrasi tinggi dapat menyebabkan kerusakan paru-paru dan bahkan kematian (Yudo, 2010).

Menurut Effendi (dalam Mahyudin, 2015) kadar amonia pada perairan alami biasanya kurang dari 0,1 mg/l. Kadar ammonia yang tinggi dapat

diindikasikan adanya pencemaran bahan organik yang berasal dari limbah domestik, limbah industri, maupun limpasan pupuk pertanian.

2.10.5. Minyak dan Lemak pada Minyak Bumi

Komponen penyusun minyak bumi salah satunya adalah hidrokarbon. Alkana, alkane dan *Polycyclic Aromatic Hydrocarbons* (PAH) merupakan contoh dari hidrokarbon. Hidrokarbon merupakan senyawa yang memiliki struktur hanya karbon dan hidrogen.

Karakteristik minyak bumi pada umumnya memiliki nilai viskositas yang ditentukan oleh berat molekul, panjang molekul dan cabang molekul tersebut. Minyak bumi dalam keadaan oksidasi yang stabil pada suhu dibawah 100°C. Pengelompokan dari minyak bumi ini terbagi menjadi tiga, yaitu:

a. Paraffinic

Paraffinic merupakan jenis minyak dan lemak yang terdiri dari pencampuran gugus alkana; hidrokarbon yang memiliki rantai karbon jenuh dengan hidrogen. Rantai hidrokarbon dapat memanjang maupun bercabang.

b. Naphthenic

Naphthenic merupakan jenis minyak dan lemak yang terdiri dari lima hingga enam gugus hidrokarbon siklik dengan satu atau lebih gugus karbon siklik jenuh. Naphthenic memiliki densitas yang lebih besar daripada Paraffinic.

c. Aromatic

Aromatic merupakan hidrokarbon yang memiliki ikatan karbon rangkap dan ikatan tunggal konjugasi. Aromatic memiliki densitas yang lebih tinggi dari Naphtenic, stabil dalam keadaan suhu tinggi dan titik lebur yang rendah. (Maharani, 2017)

Minyak dan Lemak merupakan bahan organik yang mempunyai rantai karbon yang panjang dan kompleks (Hendrawan, 2008). Menurut Metcalf & Eddy (1991) (dalam Hendrawan, 2008) dampak yang nyata dari adanya minyak dan lemak di permukaan air adalah terhalangnya penetrasi sinar matahari yang berarti mengurangi laju proses fotosintesis di air. Penutupan itu juga akan mengurangi

masukannya O₂ bebas dari udara dan air. Kurangnya laju fotosintesis dan masukannya O₂ dari udara akan mengganggu organisme yang ada di air. Komponen-komponen hidrokarbon aromatik seperti benzena, toluena dan xilena bersifat racun terhadap manusia dan kehidupan lainnya. Sebagian emulsi minyak dan lemak akan mengalami degradasi melalui oksidasi oleh mikroorganisme. Penguraian minyak dan lemak dalam kondisi kurang oksigen akan menyebabkan penguraian yang tidak sempurna sehingga menimbulkan bau tengik.

2.10.6. pH (Keasaman)

pH atau Keasaman ditetapkan berdasarkan tinggi rendahnya konsentrasi ion hidrogen dalam air. Air buangan yang mempunyai pH tinggi atau rendah dapat membunuh mikroorganisme air yang diperlukan untuk keperluan biota tertentu. pH suatu perairan sangat penting mengingat dalam perairan tersebut hidup biota dan ikan, juga air dari perairan juga digunakan untuk kegiatan pertanian. pH Air dengan nilai pH sekitar 6,5 – 7,5 merupakan peningkatan pH yang normal sehingga air telah memenuhi syarat untuk suatu kehidupan (Wardhana, 2004 dalam Mahyudin, 2015).

2.11. Pengelolaan Limbah Minyak

Lasari (2010) (dalam Sudarman dkk., 2011), pengolahan limbah minyak bumi dilakukan secara fisika, kimia dan biologi. Pengolahan secara fisika dilakukan untuk pengolahan awal yaitu dengan cara melokalisasi tumpahan minyak menggunakan pelampung pembatas (*oil booms*), yang kemudian akan ditransfer dengan perangkat pemompa (*oil skimmers*) ke sebuah fasilitas penerima “reservoir” baik dalam bentuk tangki ataupun balon dan dilanjutkan dengan pengolahan secara kimia, namun biayanya mahal dan dapat menimbulkan pencemar baru. Pengolahan limbah secara biologi merupakan alternatif yang efektif dari segi biaya dan aman bagi lingkungan. Pengolahan dengan metode biologis disebut juga bioremediasi, yaitu bioteknologi yang memanfaatkan makhluk hidup khususnya mikroorganisme untuk menurunkan konsentrasi atau daya racun bahan pencemar.

Anonim (1994) (dalam Sudarman dkk., 2011), secara umum beberapa teknik penanggulangan tumpahan minyak yang menjadi limbah diantaranya in-situ burning, penyisihan secara mekanis, bioremediasi, penggunaan sorbent, penggunaan bahan kimia dispersan, dan *washing oil*.

- a. *In-situ* burning adalah pembakaran minyak pada permukaan laut, sehingga mengatasi kesulitan pemompaan minyak dari permukaan laut, penyimpanan dan pewadahan minyak serta air laut yang terasosiasi. Teknik ini membutuhkan booms (pembatas untuk mencegah penyebaran minyak) atau barrier yang tahan api. Namun, pada peristiwa tumpahan minyak dalam jumlah besar sulit untuk mengumpulkan minyak yang dibakar. Selain itu, penyebaran api sering tidak terkontrol.
- b. Penyisihan minyak secara mekanis melalui 2 tahap, yaitu melokalisasi tumpahan dengan menggunakan booms dan melakukan pemindahan minyak ke dalam wadah dengan menggunakan peralatan mekanis yang disebut *skimmer*.
- c. Bioremediasi yaitu proses pendaurulangan seluruh material organik. Bakteri pengurai spesifik dapat diisolasi dengan menebarkannya pada daerah yang terkontaminasi. Selain itu, teknik bioremediasi dapat menambahkannutrisi dan oksigen, sehingga mempercepat penurunan polutan.
- d. Penggunaan sorbent dilakukan dengan menyisihkan minyak melalui mekanisme adsorpsi (penempelan minyak pad permukaan sorbent) dan absorpsi (penyerapan minyak ke dalam sorbent). Sorbent ini berfungsi mengubah fasa minyak dari cair menjadi padat, sehingga mudah dikumpulkan dan disisihkan. Sorbent harus memiliki karakteristik hidrofobik, oleofobik, mudah disebarkan di permukaan minyak, dapat diambil kembali dan digunakan ulang. Ada 3 jenis sorbent yaitu organik alami (kapas, jerami, rumput kering, serbuk gergaji), anorganik alami (lempung, vermiculite, pasir) dan sintesis (busa poliuretan, polipropilen dan serat nilon).
- e. Dispersan kimiawi merupakan teknik memecah lapisan minyak menjadi tetesan kecil (*droplet*), sehingga mengurangi kemungkinan

terperangkapnya hewan ke dalam tumpahan minyak. Dispersan kimiawi adalah bahan kimia dengan zat aktif yang disebut surfaktan.

f. *Washing oil* yaitu kegiatan membersihkan minyak dari pantai.

Menurut Arifin dkk. (2004) (dalam Sudarman dkk., 2011) terdapat tiga cara untuk mengatasi masalah lahan tercemar minyak yang dapat dipilih berdasarkan jenis minyak pencemar, konsentrasi minyak pencemar dan lokasi pencemaran, yakni dibakar, diberi disperser dan kemudian dihisap kembali dengan skimmer untuk diolah di kilang minyak, dan didegradasi dengan memanfaatkan mikroorganisme pendegradasi hidrokarbon. Bioremediasi, pengelolaan yang mengandalkan degradasi dengan memanfaatkan mikroorganisme pendegradasi hidrokarbon, merupakan cara yang paling ekonomis dan dapat diterima lingkungan. Bioremediasi dapat digunakan untuk mengatasi masalah lahan tercemar minyak baik secara *in situ* maupun *ex situ*. Biostimulation dan bioaugmentation merupakan contoh pelaksanaan bioremediasi secara *in situ*, sedangkan landfarming, biopile, dan composting merupakan contoh pelaksanaan bioremediasi secara *ex situ*.

Menurut Sudarman dkk. (2011), dalam pelaksanaan bioremediasi, baik secara *in situ* maupun *ex situ*, perlu dilakukan pemantauan terhadap proses pengolahan dan hasil akhir pengolahan. Hal itu perlu dipantau adalah kandungan minyak bumi dan/atau kandungan total hidrokarbon minyak bumi. Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup no. 128 tahun 2003 tentang Tata Cara dan Persyaratan Teknis Pengolahan Limbah Minyak Bumi dan Tanah Terkontaminasi oleh Minyak Bumi secara Biologis mensyaratkan kandungan total hidrokarbon minyak bumi yang tidak lebih dan 15 % di awal proses bioremediasi. Selama proses bioremediasi, kandungan total hidrokarbon minyak bumi perlu dipantau setidaknya setiap 2 minggu. Pemantauan kandungan bensena, toluene, etil-bensena, silena, dan hidrokarbon polisiklik aromatic perlu dilakukan di akhir proses bioremediasi. Kandungan total hidrokarbon minyak bumi di akhir proses bioremediasi disyaratkan di bawah 1 %. Di akhir proses bioremediasi, kandungan toluene, etil-bensena, silena, dan hidrokarbon polisiklik aromatic disyaratkan masing-masing berada di bawah 10 ppm, sedangkan kandungan bensena disyaratkan berada di bawah 10 ppm.

2.12. Degradasi Minyak

Menurut Atlas dan Bartha (1992) (dalam Zam, 2011) pengelolaan dengan menggunakan organisme merupakan alternatif penanggulangan limbah minyak bumi yang murah, efektif, ramah lingkungan dan menyebabkan terjadinya degradasi limbah yang menghasilkan senyawa akhir yang stabil dan tidak beracun, namun metode ini membutuhkan waktu yang lebih lama dibandingkan dengan cara fisika atau kimia

Tingginya tingkat degradasi TPH pada perlakuan dapat dipengaruhi oleh faktor penguapan dan kemampuan dari konsorsium bakteri hidrokarbon oklastik yang ditambahkan dalam mendegradasi senyawa-senyawa hidrokarbon (Zam, 2011). Atlas (1981) (dalam Zam, 2011) mengemukakan tidak ada individu mikroorganisme yang dapat mendegradasi hidrokarbon secara sempurna. Oleh karena itu populasi campuran mikroorganisme dengan bermacam-macam kapasitas enzimatis diperlukan untuk mendegradasi campuran hidrokarbon yang kompleks, seperti minyak bumi.

Menurut Von Wedel dkk. (1988) (dalam Zam, 2011) konsentrasi oksigen merupakan faktor pembatas laju biodegradasi minyak bumi. Menurut Alexander (1999); Van Hamme dkk. (2003); Madigan dan Matinko (2006) (dalam Zam, 2011) keberadaan oksigen akan meningkatkan proses degradasi. Oksigen diperlukan untuk disisipkan ke dalam hidrokarbon oleh enzim oksigenase. Selain itu oksigen juga diperlukan untuk oksidasi hidrokarbon.

Biodegradasi alkana yang terdapat dalam minyak bumi akan membentuk alkohol dan selanjutnya menjadi asam lemak. Asam lemak hasil degradasi alkana akan dioksidasi lebih lanjut membentuk asam asetat dan asam propionat, sehingga dapat menurunkan nilai pH medium (Rosenberg, E., dkk., 1992; Nugroho, 2006 dalam Aliyanta, 2011). Nugroho (2009) (dalam Aliyanta, 2011) mengemukakan bahwa biodegradasi hidrokarbon alifatik biasanya terjadi pada kondisi aerob. Tahap awal degradasi hidrokarbon secara aerob adalah memasukkan molekul oksigen ke dalam hidrokarbon oleh enzim oksigenase.

Penurunan kontaminan petroleum hidrokarbon yang terkandung dalam minyak sintetis dapat terjadi secara fisika dan biologis. Secara fisika senyawa organik dalam minyak bumi akan diambil oleh tanaman dengan mekanisme

adsorpsi. Senyawa-senyawa ini akan diadsorpsi bersama dengan nutrisi yang terlarut dalam air. Adsorpsi dilakukan oleh akar tanaman menuju dinding sel tanaman kemudian akan tersebar ke seluruh bagian tanaman. Kemampuan akar untuk memisahkan dan menyerap kontaminan yang terlarut dalam air disebut dengan *rhizofiltration*. Karena permukaan akar dijadikan sebagai tempat hidup bagi beberapa mikroorganisme yang berperan dalam mereduksi kontaminan yang terlarut dalam air. Proses ini dipengaruhi oleh temperatur, pH air, sifat hidrofobik kontaminan, berat molekul dan nutrisi yang ada dalam air. Selain proses penyerapan, degradasi secara fisika lainnya adalah penguapan. Kecepatan penguapan hidrokarbon berhubungan dengan kelarutan dalam cairan dan tekanan uap dari masing-masing kontaminan (Ratna, 2007 dalam Yuliani, 2019).

Proses degradasi secara biologis melibatkan mikroorganisme yang hidup di permukaan akar tanaman. Kemampuan bakteri dalam mendegradasi petroleum hidrokarbon sesuai dengan urutan yaitu: n-alkana > alkana rantai bercabang > petroleum hidrokarbon > alkane rantai siklik. Senyawa hidrokarbon alisiklik maupun hidrokarbon aromatik relatif lebih sulit didegradasi, namun dari senyawa tersebut telah diketahui cara mengatasinya yang efektif dengan proses biokimia. Proses oksidasi hidrokarbon pertama dilakukan oleh bakteri aerob. Dalam hal ini gugus metal terminal dioksidasi membentuk alkohol primer. Alkohol primer yang terbentuk akan dioksidasi lebih lanjut menjadi aldehida. Senyawa ini kemudian dioksidasi menjadi asam-asam lemak oleh enzim dehydrogenase yang memerlukan NAD. Selanjutnya asam lemak mengandung proses β -oksidasi untuk kemudian memasuki siklus krebs. Senyawa hidrokarbon aromatik dioksidasi terlebih dahulu menjadi senyawa intermediat non aromatik. Senyawa intermediat yang sering dijumpai adalah katekol, protokatekuat, gentisat dan β -ketodipat. (Yuliani, 2019)

Peranan bakteri dalam fitoremediasi tidak dapat dipisahkan karena bakteri tumbuh secara alamiah pada akar tanaman. Tanaman mengekskresikan *amino acids*, karbohidrat, *nucleic acid derivatives*, faktor pertumbuhan, enzim dan produk lainnya yang memacu mikroorganisme yang tumbuh di akar (*rhizosphere*) yang berfungsi untuk meningkatkan degradasi substrat organik. Kemampuan mikroorganisme seperti bakteri melakukan penguraian suatu bahan dalam media

disebut dengan biodegradasi. Banyak faktor yang mempengaruhi biodegradasi diantaranya oleh aktivitas dari mikroorganismenya sendiri dan faktor lingkungan hidupnya (Ratna, 2007 dalam Yuliani, 2019). Beberapa jenis bakteri yang merupakan pendegradasi hidrokarbon yang efektif di lingkungan alami telah diisolasi antara lain: *Pseudomonas aeruginosa*, *P. putida*, *Bacillus subtilis*, *B. Cereus*, *B. laterospor* (Nababan, 2008).