

PENGELOLAAN LIMBAH PADAT, LIMBAH INDUSTRY DAN B3

Bambang Suhartawan, Hasti Suprihatin, Nururrahmah,
Hafidawati, Elsa Yuniarti, Wayan Budiarsa Suyasa,
Isran Asnawi, Erwin Prasetya Toepak



PENGELOLAAN LIMBAH PADAT, LIMBAH INDUSTRY DAN B3

**Bambang Suhartawan
Hasti Suprihatin
Nururrahmah
Hafidawati
Elsa Yuniarti
Wayan Budiarsa Suyasa
Isran Asnawi
Erwin Prasetya Toepak**



GET PRESS INDONESIA

PENGELOLAAN LIMBAH PADAT, LIMBAH INDUSTRY DAN B3

Penulis :

Bambang Suhartawan
Hasti Suprihatin
Nururrahmah
Hafidawati
Elsa Yuniarti
Wayan Budiarsa Suyasa
Isran Asnawi
Erwin Prasetya Toepak

ISBN : 978-623-198-636-8

Editor : Mila Sari,S.ST,. M.Si

Rantika Maida Sahara, S.Tr.Kes

Penyunting : Aulia Syaharani, S.Tr.Kes

Desain Sampul dan Tata Letak : Atyka Trianisa, S.Pd

Penerbit : GET PRESS INDONESIA

Anggota IKAPI No. 033/SBA/2022

Redaksi :

Jln. Palarik Air Pacah No 26 Kel. Air Pacah
Kec. Koto Tangah Kota Padang Sumatera Barat
Website : www.getpress.co.id
Email : adm.getpress@gmail.com

Cetakan pertama, 28 Agustus 2023

Hak cipta dilindungi undang-undang
Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk dan
dengan cara apapun tanpa izin tertulis dari penerbit.

KATA PENGANTAR

Segala Puji dan syukur atas kehadiran Allah SWT dalam segala kesempatan. Sholawat beriring salam dan doa kita sampaikan kepada Nabi Muhammad SAW. Alhamdulillah atas Rahmat dan Karunia-Nya penulis telah menyelesaikan Buku Pengelolaan Limbah Padat, Limbah Industry Dan B3 ini.

Buku ini membahas Resiko dan dampak limbah, Langkah – langkah dan komponen kunci dalam pengelolaan limbah pada, Pengolahan limbah padat (termal, *biological treatment*), Contoh – contoh pemanfaatan dan teknologi limbah padat, Pengantar limbah B3, Peraturan perundangan, Dasar-dasar proses, Metode pengolahan limbah B3 secara kimia, fisika, biologis, stabilisasi dan solidifikasi, termal, Pembuangan limbah B3.

Proses penulisan buku ini berhasil diselesaikan atas kerjasama tim penulis. Demi kualitas yang lebih baik dan kepuasan para pembaca, saran dan masukan yang membangun dari pembaca sangat kami harapkan.

Penulis ucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah mendukung dalam penyelesaian buku ini. Terutama pihak yang telah membantu terbitnya buku ini dan telah mempercayakan mendorong, dan menginisiasi terbitnya buku ini. Semoga buku ini dapat bermanfaat bagi masyarakat Indonesia.

Padang, 28 Agustus 2023

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR TABEL	vii
BAB 1 RISIKO DAN DAMPAK LIMBAH PADA	
LINGKUNGAN HIDUP	1
1.1 Pendahuluan	1
1.2 Risiko Lingkungan	2
1.3 Dampak Limbah	5
DAFTAR PUSTAKA.....	16
BAB 2 LANGKAH-LANGKAH DAN KOMPONEN	
KUNCI DALAM PENGELOLAAN LIMBAH PADAT	19
2.1 Pengertian Limbah Padat	19
2.2 Pengertian Pengelolaan Sampah	19
2.3 Perkembangan Pengelolaan Persampahan.....	20
2.4 Aspek-Aspek Penanganan Persampahan.....	21
2.5 Faktor-Faktor yang Memengaruhi Sistem	
Pengelolaan Sampah Perkotaan.....	26
2.6 Pengolahan Sampah	27
2.7 Beberapa Langkah dan Komponen Penting	
dalam Pengelolaan Sampah Perkotaan	27
2.7.1 Timbulan Sampah	27
2.7.2 Faktor-Faktor yang Memengaruhi Jumlah	
Timbulan Sampah	28
2.7.3 Pewadahan Sampah	29
2.7.4 Pengumpulan Sampah.....	31
2.7.5 Pemandahan.....	33
2.7.6 Pengangkutan Sampah.....	34
2.7.7 Pembuangan Akhir Sampah	34
DAFTAR PUSTAKA.....	37

BAB 3 PENGOLAHAN LIMBAH PADAT	39
3.1 Pendahuluan.....	39
3.2 Jenis Limbah.....	39
3.3 Limbah Padat	43
3.4 Pengolahan Limbah Padat.....	45
DAFTAR PUSTAKA	49
BAB 4 PEMANFAATAN TEKNOLOGI LIMBAH PADAT	51
4.1 Pendahuluan.....	51
4.2 Limbah Padat	52
4.3 Pemanfaatan Limbah Padat Dan Teknologi Pemanfaatan.....	53
4.3.1 Limbah Pertanian dan Perikanan	53
4.3.2 Limbah Sampah Rumah Tangga	57
4.3.3 Limbah Industri Perkebunan	60
DAFTAR PUSTAKA	65
BAB 5 PENGANTAR LIMBAH B3	67
5.1 Pendahuluan.....	67
5.2 Definisi Limbah B3.....	69
5.2.1 Sumber Limbah B3	70
5.2.2 Klasifikasi Limbah B3.....	71
5.2.3 Pengelolaan Limbah B3.....	73
5.3 Pencemaran Limbah B3.....	75
5.3.1 Contoh Kasus Pencemaran Limbah B3.....	77
DAFTAR PUSTAKA	79
BAB 6 DASAR-DASAR PROSES PENGOLAHAN LIMBAH PADAT.....	81
6.1 Limbah Anorganik dan Limbah Organik.....	81
6.1.1 Pengolahan Limbah Anorganik	83
6.2 Pengolahan Biomassa.....	89
6.2.1 Gasifikasi Biomassa	89
6.2.2 Biohidrogen	91
6.2.3 Komposting.....	94
6.3 Digester Anaerobik.....	100

DAFTAR PUSTAKA.....	111
BAB 7 METODE PENGOLAHAN LIMBAH B3	115
7.1 Latar Belakang dan Prinsip Pengolahan	115
7.2 Solidifikasi.....	116
7.2.1 Pemadatan menggunakan pozzolan dan semen portland	116
7.2.2 Enkapsulasi	119
7.2.3 Vitrifikasi.....	122
7.3 Stabilisasi.....	122
7.3.1 Pengolahan secara fisika	123
7.3.2 Pengolahan secara kimia	124
7.3.3 Pengolahan secara biologi.....	126
7.3.4 Teknologi terkini pengolahan limbah B3	127
7.4 Termal.....	129
DAFTAR PUSTAKA.....	132
BAB 8 PEMBUANGAN LIMBAH BAHAN BERBAHAYA DAN BERACUN	133
8.1 Praktek Baik Pengangkutan Limbah Bahan Berbahaya Dan Beracun.....	133
8.1.1 Pendahuluan	133
8.1.2 Moda Pengangkutan Limbah Berbahaya.....	134
8.1.3 Persyaratan Transportasi.....	135
8.1.4 Informasi Tanggap Darurat	136
8.1.5 Insiden Pengangkutan Bahan Berbahaya	137
8.2 Praktik Baik Penggunaan Alat Pelindung Diri	138
8.2.1 Pendahuluan	138
8.2.2 Mengembangkan Program APD	139
8.2.3 Pemilihan Alat Pernapasan.....	141
8.2.4 Pemilihan PPC.....	143
8.3 Praktik Baik Pembuangan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun Di Lahan.....	145
8.3.1 Pendahuluan	145
8.3.2 Gedung Penampungan	146

8.3.3 Persyaratan Tempat Pembuangan Akhir B3	
Yang Aman.....	146
8.3.4 Kompatibilitas Liner Dengan Limbah B3	149
8.4 Dasar Hukum Pembuangan Limbah Bahan	
Berbahaya Dan Beracun	151
DAFTAR PUSTAKA	154
BIODATA PENULIS	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. Limbah gas PLTU Suralaya, Banten	7
Gambar 1.2. Interaksi Faktor Lingkungan.....	11
Gambar 2.1. Bagan teknik operasional pengelolaan persampahan	22
Gambar 3.1. Tumpukan sampah anorganik dan organik di TPA.....	40
Gambar 3.2. Ampas sagu sisa hasil produksi tepung sagu yang dibuang ke lingkungan	41
Gambar 3.3. Limbah padat anorganik	44
Gambar 4.1. Vermikomposting dari Limbah Pertanian	56
Gambar 4.2. Eksmecat dari sampah organik limbah rumah tangga	58
Gambar 4.3. Proses Pengolahan Sampah Menggunakan Biodryng.....	60
Gambar 4.4. Limbah Pengolahan Sagu.....	61
Gambar 4.5. Kompos Blok dari Limbah Sagu.....	62
Gambar 4.6. Briket Bio arang Ampas Sagu.....	64
Gambar 5.1. Presentase Limbah Tahun 2020.....	73
Gambar 6.1. Flow Proses Insenerasi.....	86
Gambar 6.2. Profil Sumur Injeksi.....	88
Gambar 6.3. Digester satu tahap.....	101
Gambar 6.4. Digester 2 tahap	102

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1. Matriks Risiko Lingkungan.....	4
Tabel 1.2. Limbah cair dan dampaknya terhadap lingkungan	5
Tabel 6.1. Karakteristik persyaratan bahan kompos	98
Tabel 6.2. Kandungan Umum Biogas	103

BAB 1

RISIKO DAN DAMPAK LIMBAH PADA LINGKUNGAN HIDUP

Oleh Bambang Suhartawan

1.1 Pendahuluan

Limbah merupakan buangan yang dihasilkan oleh kegiatan industri maupun domestik (rumah tangga) (Waluyo, 2018). Limbah adalah sisa suatu Usaha dan/atau Kegiatan (PP 22, 2021). Limbah juga dapat dihasilkan oleh kegiatan pertanian, rumah sakit, perdagangan, perkantoran dan fasilitas umum lainnya. Limbah yang terbuang langsung ke lingkungan dapat berdampak negatif jika jumlah dan konsentrasinya tinggi. Keberadaan limbah yang semakin banyak dapat menyebabkan terjadinya pencemaran lingkungan, yang meliputi air, udara dan tanah serta menyebabkan bau tidak sedap, dapat menjadi sumber penyakit bahkan terjadinya bencana.

Limbah adalah sisa dari suatu kegiatan industri umumnya mengandung bahan berbahaya dan beracun (B3) karena sifat, konsentrasi dan jumlahnya, baik secara langsung maupun tidak langsung berdampak negatif bahkan membahayakan lingkungan, kesehatan, kelangsungan hidup manusia dan makhluk hidup lainnya termasuk tumbuhan. Bahan yang sering ditemukan dalam limbah adalah senyawa organik yang dapat dihancurkan oleh mikroba (*biodegradasi*), senyawa organik yang mudah menguap, senyawa organik yang sulit terurai (*rekalsitran*), limbah anorganik seperti logam berat dan toksit, padatan teruspensi, juga limbah berupa nutrien, parasit dan mikroba pathogen.

Kriteria Baku Kerusakan Lingkungan Hidup adalah ukuran batas perubahan sifat fisik, kimia, dan/atau hayati Lingkungan Hidup yang dapat ditenggang oleh Lingkungan Hidup untuk dapat tetap melestarikan fungsinya (PP 22, 2021). Dengan demikian ukuran batas kerusakan lingkungan terjadi apabila kondisi lingkungan berada di luar batas yang telah ditetapkan. Keadaan seperti ini dapat dikatakan bahwa telah terjadi pencemaran lingkungan.

1.2 Risiko Lingkungan

Telah diamanatkan dalam Undang-Undang Nomor 23 Tahun 1997, bahwa hasil limbah industri sebelum dibuang ke perairan bebas atau badan air harus dilakukan pengolahan terlebih dahulu untuk meminimasi risiko sehingga tidak terjadi pencemaran lingkungan.

Guna meminimasi risiko yang akan terjadi yang merupakan dampak adanya limbah yang dihasilkan oleh industri, perlu dilakukan proses pengolahan limbah seperti misalnya dengan *incinerator* atau IPAL (Instalasi Pengolahan Air Limbah) sebagai proses manajemen lingkungan untuk menghasilkan limbah yang ramah lingkungan.

Manajemen risiko lingkungan merupakan proses sistematis untuk meramalkan bahaya lingkungan yang akan terjadi dengan menganalisis konsekuensi dan kemungkinan serta mengatur tingkat risiko yang akan terjadi (Stoklosa, 1999). Terdapat 4 (empat) hal yang perlu dilakukan dalam mengelola manajemen resiko lingkungan, yakni :

1. *Problem Formulation*

Adalah evaluasi terhadap permasalahan yang dimungkinkan akan terjadi terhadap lingkungan dan mengapa dapat terjadi.

Ini merupakan bagian permulaan dalam rangka menilai risiko lingkungan. Beberapa hal terkait perumusan masalah (*Problem Formulation*) meliputi :

- a. Identifikasi dan gambaran permasalahan,
- b. Mengelompokkan dan menggabungkan informasi yang tersedia,
- c. Menyusun rumusan model permasalahan,
- d. Menyusun perencanaan analisis risiko.

2. Risk Analysis

Risiko adalah sesuatu hal yang dimungkinkan (*likelihood*) akan terjadi dan berdampak pada pencapaian hasil atau tujuan yang merupakan konsekuensi (*consequences*).

Perhitungan risiko dapat dirumuskan sebagai perkalian dari konsekuensi dengan kemungkinan.

$$Risk = Likelihood \times Consequences$$

Nilai risiko diperoleh melalui kombinasi nilai kemungkinan (*likelihood*) dan efek atau dampak (*consequences*).

3. Risk Characterization

Tingkat risiko dapat diperoleh dengan cara melakukan pengelompokan nilai *likelihood* dan *consequences* pada matriks risiko lingkungan. Risk Characterization adalah langkah terakhir dari suatu penilaian risiko lingkungan.

Tabel 1.1. Matriks Risiko Lingkungan

<i>Likelihood</i>	<i>Consequences</i>				
	1 <i>Insignifi cant</i>	2 <i>Minor</i>	3 <i>Moder at</i>	4 <i>Major</i>	5 <i>Catastro phic</i>
(A) <i>Almost certain</i>	H	H	E	E	E
(B) <i>Likely</i>	M	H	H	E	E
(C) <i>Moderate</i>	L	M	H	E	E
(D) <i>Unlikely</i>	L	L	M	H	E
(E) <i>Rare</i>	L	L	M	H	H

Keterangan :

E : Extreme Risk – risiko ekstrim atau sangat tinggi dan sangat serius dan perlu tindakan dengan segera.

H : High Risk – risiko tinggi, terjadi jika minimasi risika gagal.

M : Moderate Risk – risiko sedang, diterima dengan persetujuan.

L : Low Risk – risiko rendah dapat diterima secara rutin.

4. Risk Management

Risk Management adalah suatu keputusan yang dipilih perusahaan/industri dalam mempertimbangkan strategi minimasi kemungkinan terjadinya risiko lingkungan atau merupakan mitigasi risiko lingkungan.

1.3 Dampak Limbah

Kegiatan industri merupakan hal yang sangat penting dalam menunjang pembangunan perekonomian guna meningkatkan taraf hidup bangsa Indonesia. Dampak positif yang bisa dirasakan oleh masyarakat Indonesia dari kegiatan industry adalah tersedianya produk barang dan jasa, meningkatkan lapangan kerja sehingga kesejahteraannya pun meningkat. Sedangkan dampak negatifnya adalah dihasilkannya bahan buangan (limbah) sebagai penyebab terjadinya pencemaran dan berkurangnya persediaan SDA.

Menurut wujud dan dampaknya, limbah industri dan domestik dikelompokkan menjadi tiga, yaitu :

1. *Limbah Cair*

Limbah industri cair sering menjadi masalah jika dibuang tanpa dilakukan pengolahan terlebih dahulu. Jika volume dan konsentrasinya tinggi akan berdampak terjadinya pencemaran lingkungan. Volume dan konsentrasi tergantung dari sumbernya dan sejauh mana telah dilakukan pengolahan atau pemisahan sebelum dibuang ke perairan bebas.

Tabel 1.2. Limbah cair dan dampaknya terhadap lingkungan

No	Limbah	Dampak	Sumer/Industri
1	Bahan yang dapat dibioksidasi dinyatakan dalam BOD	Deoksigenasi, anaerob, bau dan kematian	Industri gula, Alkohol, Susu, Pulp dan Kertas dan pada Pengalengan
2	Zat Racun : As, CN, Cr, Cd, Cu, F, Hg, Pb dan Zn	Kematian pada ikan dan plankton, keracunan pada ternak dan manusia,	Pembersih logam, plating, pengasaman, pemurnian fosfat dan bauxite, industri batere,

No	Limbah	Dampak	Sumer/Industri
		terakumulasi dalam ikan dan muloska	penyamakan kulit dan industri yang mengeluarkan khlor.
3	Asam dan Alkali	Perubahan system ekologi, gangguan system penyangga pH.	Industri batubara, tekstil, wool dan kimia, pengasaman besi.
4	Desinfektan : Cl ₂ , H ₂ O ₂ , phenol dan formalin	Berasa, berbau dan kematian pada mikroorganisme.	Pemucatan kertas dan tekstil, resin sintetis, penicillin, zat warna dan industri kimia.
5	Ion-ion : Fe ³⁺ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Mn ³⁺ , Cl ⁻ dan SO ₄ ²⁻	Salinitas, kesadahan, warna, bau, rasa pada air	Metalurgi, sumur, semen, keramik dan minyak bumi
6	Bahan pengoksidasi dan pereduksi : NH ₃ , NO ₂ , NO ₃ dan SO ₃	Deoksigenasi, kelebihan nutrisi (<i>eotrofikasi</i>), bau dan pertumbuhan mikroba	Industri gas, coke, pupuk, bahan peledak, tekstil dan pulp

Sumber : Supraptini, 2002

2. Limbah Gas

Limbah gas debu beserta butiran-butiran halus yang dihasilkan oleh kegiatan industry perlu dikelola dengan baik agar tidak banyak merusak lingkungan. Penggunaan cerobong asap yang tinggi bertujuan agar asap/gas yang keluar mengalami pengenceran oleh udara di sekitar sehingga dampak negatif terhadap lingkungan sekitar semakin berkurang.



Gambar 1.1. Limbah gas PLTU Suralaya, Banten
Sumber : <https://rumahberkelanjutan.id/semburan-asap-hitam-cerobong-pltu/>

Keberadaan debu dan gas beracun di udara memiliki dampak negatif terhadap Kesehatan manusia antara lain :

a. Debu

- 1) Mengganggu pernapasan dan jika debu mengandung Pb menyebabkan gangguan syaraf, saluran pernapasan dan anemia.
- 2) Menyebabkan kanker jika debu mengandung serat asbes.

b. Smog (kabut/asap)

- 1) Mengganggu pengelihatan (jarak pandang semakin pendek)
- 2) Mengganggu pernafasan (sesak nafas)

c. Gas beracun

- 1) Karbon monoksida (CO) menyebabkan gangguan fungsi otak.
- 2) Belerang dioksida (SO₂), Nitrogen dioksida (NO₂), Ozon (O₃), Amoniak (NH₃), asam sulfida (H₂S) dan

senyawa aromatik dapat menyebabkan iritasi mata dan gangguan pernafasan.

Gangguan limbah gas terhadap hewan secara langsung dapat mengganggu pernafasan, terjadi akumulasi cemaran pada tubuh hewan akibat memakan daun yang telah tercemar debu yang mengandung Pb. Jika hewan dikonsumsi manusia maka cemaran logam Pb akan terakumulasi pada tubuh manusia dan menyebabkan terganggunya kesehatan pada manusia.

Dampak lain yang tergolong cemaran gas adalah terjadinya efek rumah kaca dimana kandungan gas CO₂ di atmosfer sangat tinggi, menipisnya lapisan ozon hingga menyebabkan terjadinya pemanasan global dan ini akan berpengaruh langsung maupun tidak langsung terhadap kehidupan di muka bumi baik manusia, hewan dan tumbuhan. Pengaruh langsung yang pernah terjadi adalah meningkatnya penderita katarak, menyebabkan kanker, menyebabkan perubahan respon kekebalan. Sedangkan dampak yang tidak langsung adalah meningkatnya penyakit menular melalui vector, air, tanah dan udara, migrasi penduduk dan menurunnya produksi pangan dan gizi.

3. *Limbah Padat*

Limbah padat adalah hasil buangan industri yang berupa padatan lumpur atau bubur yang merupakan sisa dari proses pengolahan. Limbah padat domestik umumnya berbentuk limbah padat yang dihasilkan dari rumah tangga, perdagangan, perkantoran, pertanian, peternakan dan fasilitas-fasilitas umum. Limbah padat domestik biasa disebut sampah.

Adanya timbunan sampah yang tidak Kelola dengan baik akan berdampak negatif yang sangat serius terhadap lingkungan sekitar. Beberapa dampak tersebut adalah :

- a. Terjadinya gas beracun seperti H_2S , NH_3 , CH_4 dan CO_2 serta gas-gas lainnya yang dikarenakan oleh pembusukan sampah.
- b. Penurunan kualitas air akibat pembuangan sampah ke dalam badan air atau aliran air seperti sungai.
- c. Penurunan kualitas udara akibat meningkatnya gas-gas beracun seperti H_2S , NH_3 , CH_4 di udara. Kandungan gas H_2S 50 ppm dapat menyebabkan mabuk dan pusing bagi manusia.
- d. Kerusakan permukaan tanah akibat timbunan sampah padat yang tidak dikelola dengan baik.

4. Limbah B3

Kasus yang pernah terjadi di Teluk Minamata Jepang tahun 1956 membuktikan bahwa begitu bahayanya limbah B3 jika dibuang tanpa pengolahan terlebih dahulu. Pencemaran merkuri (Hg) limbah industry kosmetik menyebabkan ribuan masyarakat Jepang menjadi korban tragedi minamata. Ribuan masyarakat secara tiba-tiba mengalami kelumpuhan, gangguan syaraf, kanker, bahkan berakibat kematian.

Dengan adanya kasus tersebut menjadi pelajaran bagi Indonesia. Maraknya kegiatan Pertambangan Emas Skala Kecil (PESK) yang tidak terkendali dapat memicu dihasilkannya limbah B3 seperti merkuri (Hg). Ekstraksi emas menggunakan merkuri berdampak terjadinya limbah merkuri pada perairan dan selanjutnya bermuara di laut. Imbasnya ikan yang hidup dilaut akan terkontaminasi merkuri dan berbahaya jika ikan tersebut dikonsumsi manusia. Merkuri yang menguap juga berbahaya bagi

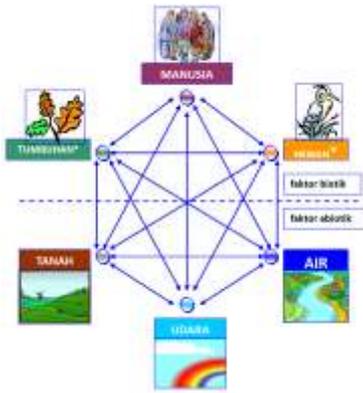
pekerja PESK karena dapat merusak organ pernafasan dan sisten syarat secara permanen.

Dampak limbah B3 terhadap Kesehatan dapat terjadi melalui dua cara, yakni secara langsung jika manusia terkontaminasi langsung dengan limbah B3 akibat ledakan, kebakaran, reagen dan zat korosif dan secara tidak langsung jika terkontaminasinya melalui vector lain.

Beberapa dampak limbah B3 terhadap kesehatan :

- a. Logan Cd (Kadmium) merupakan logam beracun dapat merusak ginjal dan jantung.
- b. Zat beracun benzene menyebabkan kerusakan pada tulang.
- c. Methyl merkuri dan timbal menyebabkan kerusakan sisten syaraf dan otak.
- d. Karbon tetrachlorida (CCl_4) merupakan zat beracun yang dapat menyebabkan liver.
- e. Zat beracun paraquat menyebabkan kerusakan hati, paru-paru, ginjal dan kematian.
- f. Cloroquine merupakan zat beracun yang dapat merusak mata, sakit kepala, diare, sakit perut, gangguan lambung dan kehilangan nafsu makan, gatal-gatal dan rambut rontok.

Limbah yang dibuang ke lingkungan, baik air, udara maupun tanah dalam jumlah dan konsentrasi tinggi akan menyebabkan terjadinya pencemaran lingkungan.



Gambar 1.2. Interaksi Faktor Lingkungan

Pencemaran yang terjadi pada media air, udara dan tanah merupakan satu kesatuan lingkungan dan saling mempengaruhi.

Demikian juga dampaknya terhadap manusia, hewan dan tumbuhan dapat terjadi secara komprehensif dan saling mempengaruhi.

Beberapa dampak pencemaran lingkungan akibat adanya limbah yang masuk baik dari industri maupun domestik adalah :

1. ***Terganggunya Keseimbangan Lingkungan***

Keseimbangan lingkungan atau ekosistem akan terganggu jika terjadi pencemaran lingkungan. Hal ini timbul karena telah terjadi perubahan tatanan atau keadaan lingkungan yang semakin tidak teratur dan semakin tidak seimbang atau rusak. Keadaan ini memaksa semua individu yang ada harus menyesuaikan menuju keseimbangan.

Punahnya spesies tertentu dapat mengubah perilaku dan pola interaksi dalam ekosistem, rantai makanan, jaring-jaring makanan dan aliran energi dalam ekosistem tersebut. Akibatnya keseimbangan lingkungan, daur materi, dan daur biogeokimia ikut terganggu.

2. ***Berkurangnya Kesuburan Tanah***

Penggunaan insektisida yang berlebihan akan memicu terjadinya pencemaran tanah yang ditandai dengan terjadinya penurunan kesuburan tanah. Selain itu penggunaan pupuk secara terus-menerus menyebabkan

tingkat keasaman tanah semakin tinggi dan sudah barang tentu berpengaruh terhadap kesuburan tanah.

Penyemprotan bahan kimia jenis organoklor oleh para petani memberikan dampak yang serius terhadap kerusakan lingkungan tanah, apalagi bahan kimia tersebut peka terhadap matahari dan sulit terurai. Pestisida yang jatuh ke tanah juga dapat mematikan organisme yang dapat menyuburkan tanah, dan akibatnya tanah menjadi tidak subur.

Kerusakan tanah dapat juga disebabkan oleh kemerosotan struktur tanah (*pemadatan dan erosi*) dan pemanfaatan tanah berlebihan. Degradasi tanah dikarenakan oleh adanya pembukaan lahan (*deforestation*) dan penebangan kayu berlebihan, penggembalaan secara berlebihan dan aktifitas pertanian dalam penggunaan pupuk dan pestisida berlebihan (Hakim, 2002).

3. Punahnya berbagai sepsies

Berbagai spesies hewan memiliki kekebalan yang berbeda. Ada yang peka dan ada pula yang tahan terhadap perubahan kerusakan lingkungan. Hewan muda dan larva sangat peka terhadap perubahan lingkungan dan adanya bahan pencemar. Sekalipun hewan dewasa mampu beradaptasi terhadap perubahan lingkungan tentu ada ambang batasnya, dan jika ambang batas terlampaui maka terjadi kematian.

Demikian juga yang dialami oleh spesies tumbuhan, untuk mempertahankan kelangsungan hidupnya harus menyesuaikan dengan perubahan lingkungan. Tumbuhan yang rentan terhadap perubahan lingkungan akan mati.

4. *Terjadinya peledakan Hama*

Penggunaan pestisida berdampak matinya predator. Jika predator punah maka serangga dan hama akan berkembang dengan pesat tanpa kendali dan terjadilah peledakan hama.

5. *Terjadinya Lubang Ozon*

Ozon dengan rumus O_3 merupakan gas yang terdapat di atmosfer bumi. Sebanyak 99% radiasi matahari ditahan oleh lapisan ozon dan sisanya 1% diteruskan sampai ke bumi. Hal ini menyebabkan radiasi ultraviolet sinar matahari di bumi tidak berbahaya bagi makhluk hidup di bumi.

Penggunaan Bahan Perusak Ozon (BPO) seperti klorofluorokarbon (CFC) dan hidroklorofluoro karbon (HCFC) merupakan pemicu penipisan ozon. Keduanya biasa digunakan sebagai pendingin (*refrigerant*) pada lemari es dan AC, bahan dorong (*aerosol*) pada kaleng semprot pengharum ruangan, peralatan kosmetik, cat semprot, semprot nyamuk dan lain-lain. Zat ini dapat bertahan dalam bentuk gas dan terakumulasi dalam jumlah besar melayang ke atmosfer. Oleh sinar ultraviolet diuraikan menjadi atom klor yang aktif. Atom klor ini selanjutnya bereaksi dengan ozon dan melepaskan oksigen yang labil. Dampak selanjutnya adalah terjadi penipisan ozon. Penipisan ozon juga dapat disebabkan oleh meningkatnya produksi karbon monoksida (CO) hasil pembakaran tidak sempurna kendaraan bermotor dan industri.

Dengan semakin tipisnya lapisan ozon di atmosfer berdampak berkurangnya filter sinar ultraviolet matahari ke bumi. Bahkan hasil penelitian tahun 1980-1991 didapatkan lubang ozon hampir seluas benua Australia.

Keadaan ini menyebabkan semakin mudahnya sinar ultraviolet matahari masuk ke bumi dan sudah tentu membahayakan kehidupan di bumi.

Penyebab penipisan ozon adalah penggunaan Halon jenis bromo clorodifluoro methane (CF_2BrCl) dan bromo trifluoro methane (CF_3Br) pada pemadam kebakaran, Karbon tertriklorida (CCl_4) dan Methyl Chloroform ($\text{CH}_3\text{-CCl}_3$) sebagai bahan pelarut, pembersih, bahan pemadam kebakaran dan pendingin. Methyl Bromida (CH_3Br) sebagai pestisida, bahan fumigan dalam pergudangan dan karantina pertanian.

6. *Terjadinya Pemekatan Hayati*

Pemekatan hayati adalah peningkatan kadar/kandungan zat pencemar/polutan melalui tubuh makhluk hidup. Merkuri (Hg) merupakan logam berat yang dihasilkan dari limbah pabrik dapat mencemari air laut. Kandungan merkuri dalam air laut dapat mengendap dalam tubuh ikan kecil, kandungan merkuri pada hewan pemakan ikan kecil semakin tinggi. Jika ikan tersebut dikonsumsi manusia maka logam merkuri akan terakumulasi dalam tubuh manusia dan berakibat terjadinya gangguan Kesehatan.

Kadar merkuri yang tinggi dalam tubuh manusia dapat merusak system syaraf dan gangguan fungsi otak sehingga dapat menurunkan daya pikir. Terpaparnya merkuri bagi ibu hamil akan menyebabkan rentan terhadap janin dan bisa berakibat cacat lahir. Tanda-tanda seseorang telah terjadi gangguan akibat terkontaminasi merkuri adalah; otot lemah, gangguan syaraf, kesemutan, mati rasa, lumpuh dan kehilangan fungsi panca Indera serta kerusakan paru-paru.

7. *Timbulnya keracunan dan Penyakit*

Bahan berbahaya dan beracun atau B3 merupakan bahan atau senyawa baik padat, cair, ataupun gas berpotensi bersifat racun bagi manusia. Banyak orang meninggal akibat keracunan limbah B3 contohnya kasus Minamata.

Limbah lain yang mudah menyebabkan penyakit adalah timbulan sampah yang tidak dikelola dengan baik. Sampah yang dibuang sembarangan dan dibiarkan bisa menyebabkan datangnya berbagai bakteri, virus dan parasite yang dapat membawa panyakit bagi manusia. Beberapa penyakit yang merupakan dampak limbah terutama sampah adalah penyakit demam berdarah (*haemorrhagic fever*), sakit perut (*muntaber*), penyakit jamur kulit.

DAFTAR PUSTAKA

- Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup. Kep 58/MenLH/12/1995. Baku Mutu Limbah Cair Bagi Kegiatan Rumah Sakit. 1995.
- Ningrum, SS., dan Tualeka, RA. 2018. *Upaya Pengendalian Risiko pada Unit Pengelolaan Limbah Medis Benda Tajam di Rumah Sakit*. JPH RECODE Maret 2018; 1 (2) : 98-108 <http://e-journal.unair.ac.id/JPHRECODE>.
- Rahmadi, A., Sari, MN., dan Indryani, E. 2022. *Pemanfaatan Limbah Industri*. CV. Banyubening Cipta Sejahtera. Banjarbaru.
- Simamora, Y., dan Kurniati, N. (TT). *Analisis Risiko pada Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) PT. Ajinomoto berdasarkan Konsep Manajemen Risiko Lingkungan*. Jurusan Teknik Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya Kampus ITS Sukolilo Surabaya 60111
- Situmorang, ADS. 2023. *Analisis Manajemen Risiko Pengelolaan Limbah Medis dalam upaya Pencegahan dan Pengendalian Covid-19 di Rumah Sakit MMC Jakarta*. CAKRAWALA – Repositori IMWI | Volume 6, Nomor 2, Maret 2023 p-ISSN: 2620-8490; e-ISSN: 2620-8814.
- Sri Subekti. 2017. *Pengaruh dan Dampak Limbah Cair Rumah Sakit terhadap Kesehatan serta Lingkungan*. Fakultas Teknik Lingkungan Universitas Padaranan, Semarang.
- Standards Australia. 1999. *Risk Management AS/NZS 4360:1999*. Standards Association of Australia, Strathfield NSW
- Stoklosa, R. 1997. *Risk Assessment For Environmental management Of The Marine Environment*. The APPEA Journal, 38 (1), 715-723

- Sulaiman, F., Ridwan, A., Ferdinant, FP., dan Rofi, B. (2019). *Rancangan Penilaian Risiko Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun (B3) dengan Pendekatan Hazard Identification Risk Assessment (HIRA)*. Flywheel: Jurnal Teknik Mesin Untirta Vol. V No. 2, Oktober 2019, hal. 44 – 50.
- Suprptini. 2002. *Pengaruh Limbah Industri terhadap Lingkungan di Indonesia*. Media Litbang Kesehatan Vol XII Nomor 2.

BAB 2

LANGKAH-LANGKAH DAN KOMPONEN KUNCI DALAM PENGELOLAAN LIMBAH PADAT

Oleh Hasti Suprihatin

2.1 Pengertian Limbah Padat

Berdasarkan wujudnya, limbah padat adalah salah satu sisa dari aktivitas manusia yang biasanya mengandung bahan berbahaya dan secara tidak langsung dapat membahayakan lingkungan. Berikut ini adalah beberapa definisi limbah padat atau sampah menurut para ahli:

1. *American Public Health Association* (APHA) mengartikan suatu hal yang tidak dapat dipakai, tidak disenangi atau sesuatu yang umumnya dibuang dan bersumber dari berbagai aktivitas manusia dan bersifat tidak terjadi dengan sendirinya.
2. Tchobanoglous (1993) mendeskripsikan zat buangan padat atau semi padat berasal dari berbagai kegiatan yang dilakukan manusia atau hewan dimana dengan sengaja dibuang karena sudah tidak diinginkan atau tidak dapat dipergunakan kembali.

2.2 Pengertian Pengelolaan Sampah

Berdasarkan Tchobanoglous (1993), pengelolaan persampahan dapat diartikan sebagai kegiatan mengatur atau mengontrol apapun yang berkaitan dengan sampah dengan mempertimbangkan segi kesehatan, ekonomi, estetika, lingkungan, keteknikan, konservasi, dan perilaku manusia. Kegiatan pengaturan tersebut dimulai dari sumber hingga pembuangan

akhir sampah seperti pengaturan terhadap timbulan sampah, pewadahan, pengumpulan, pemindahan dan pengangkutan, proses dan pembuangan akhir sampah.

Menurut lokasinya, pengelolaan sampah dapat dikategorikan menjadi 2 jenis, yaitu:

1. Penanganan setempat

Proses pengelolaan ini dilakukan secara mandiri oleh penghasil sampah dengan cara menanam sampah di dalam galian tanah pekarangannya atau dengan cara lain yang sesuai dalam proses memusnahkan sampah.

2. Penanganan terpusat

Pengelolaan limbah padat terpusat dilakukan secara komunal pada suatu area tertentu sehingga diperlukan sistem manajemen yang lebih kompleks dan mempertimbangkan berbagai aspek.

Pengelolaan sampah dapat diartikan aktivitas yang menyeluruh dan berkesinambungan dimulai dari administrasi, pembiayaan atau finansial, hukum, perencanaan dan fungsi-fungsi teknis dalam mengatasi berbagai masalah persampahan. Berbagai interdisiplin ilmu sangat diperlukan untuk memecahkan masalah sampah seperti ilmu ekonomi, kesehatan masyarakat, teknik, perencanaan kota, geografi, demografi, komunikasi, konservasi, politik dan sosiologi.

2.3 Perkembangan Pengelolaan Persampahan

Peningkatan kesadaran masyarakat terkait kesehatan, kebersihan dan keindahan suatu lingkungan menyebabkan sistem pengelolaan persampahan semakin berkembang. Selain itu, di beberapa lokasi yang memiliki keterbatasan lahan khususnya di daerah perkotaan menyebabkan pengelolaan persampahan tidak dapat dilakukan secara setempat dan beralih ke penanganan terpusat.

2.4 Aspek-Aspek Penanganan Persampahan

Berbagai pendekatan secara teknis atau non teknis sangat diperlukan untuk menangani permasalahan sampah. Menurut Tchobanoglous (1993), beberapa aspek yang perlu diperhatikan dalam menangani persoalan sampah, yaitu:

1. Aspek Institusi

Aspek institusi merupakan peranan besar karena berhubungan dengan manajemen yang jelas seperti status institusi pengelolaan persampahan, struktur organisasi pengelola persampahan, fungsi, tanggungjawab dan wewenang serta koordinasi secara vertikal dan horizontal di dalam badan pengelola persampahan.

2. Aspek Hukum atau Legal

Aspek hukum sangat diperlukan dalam pengelolaan persampahan karena berkaitan dengan berbagai peraturan yang sesuai.

3. Aspek Pembiayaan

Dalam mengelola persampahan, diperlukan sejumlah dana seperti biaya operasional dan pemeliharaan, pemulihan serta kemungkinan perluasan daerah pelayanan sesuai dengan perencanaan yang telah dilakukan.

4. Aspek Teknis Operasional

Aspek teknis operasional diartikan aspek yang memperhitungkan produksi sampah, penentuan daerah pelayanan, perencanaan pengumpulan dan pengangkutan sampah hingga ke lokasi pembuangan akhir. Selain itu, aspek ini juga menentukan berbagai peralatan yang dibutuhkan.

Berdasarkan Tchobanoglous (1993), tata cara pengelolaan sampah perkotaan harus terpadu dan meliputi dasar-dasar perencanaan dalam berbagai kegiatan seperti:

- a. Pewadahan sampah mulai dari sumbernya.
- b. Pengumpulan sampah.
- c. Pemindahan atau pengolahan sampah ke depo sampah.
- d. Pengangkutan sampah.
- e. Pembuangan akhir.

Skema teknik operasional pengelolaan persampahan dapat diilustrasikan dalam Gambar 2.1 di bawah ini.



Gambar 2.1. Bagan teknik operasional pengelolaan persampahan
Sumber: Tchobanoglous (1993)

Berikut ini adalah beberapa istilah dalam dasar-dasar perencanaan teknis operasional persampahan:

- a. Sampah merupakan limbah dengan wujud padat dan biasanya mengandung bahan organik dan anorganik. Selain itu, sampah berarti sesuatu harus diolah dan diasumsikan tidak memiliki fungsi karena membahayakan bagi lingkungan.
- b. Sampah perkotaan ialah sampah yang bersumber pada daerah kota.
- c. Timbulan sampah adalah jumlah sampah yang dihasilkan per orang per hari dalam satuan volume ataupun berat.
- d. Pewadahan sampah merupakan kegiatan menampung sampah secara sementara di sumber sampah.
- e. Pewadahan individual ialah kegiatan menampung sampah sementara pada lokasi tertentu atau wadah khusus dan bersumber dari sampah individu.
- f. Pengumpulan sampah merupakan aktivitas mengumpulkan sampah mulai dari sumber sampah (individu atau komunal) dan mengangkut ke lokasi pembuangan sementara atau akhir secara langsung atau tidak langsung.
- g. Pola pengumpulan individual langsung berarti kegiatan pengumpulan sampah dari satu rumah ke rumah lain dimana disebut sebagai sumber sampah, kemudian melalui proses pengangkutan ke tempat pembuangan akhir tanpa kegiatan pemindahan.
- h. Pola pengumpulan individual tak langsung ialah kegiatan pengambilan sampah dari sumber sampah seperti rumah tangga lalu dibawa ke lokasi pemindahan dengan gerobak dan berakhir di lokasi pembuangan akhir.

- i. Pola pengumpulan komunal langsung memiliki arti proses mengumpulkan sampah dari masing-masing lokasi pewadahan komunal kemudian diangkut ke lokasi pembuangan akhir secara langsung.
- j. Pola pengumpulan komunal tak langsung merupakan kegiatan mengumpulkan sampah dari masing-masing lokasi pewadahan komunal kemudian dibawa ke lokasi pemindahan untuk diangkut ke lokasi pembuangan akhir.
- k. Pola penyapuan jalan ialah kegiatan mengumpulkan sampah dari hasil penyapuan jalan.
- l. Pemindahan sampah merupakan tahap memindahkan sampah dari hasil pengumpulan menuju alat pengangkut kemudian dibawa ke lokasi pembuangan akhir.
- m. Pengangkutan sampah merupakan kegiatan membawa sampah dari sumber sampah atau lokasi pemindahan sampah menuju ke lokasi pembuangan akhir.
- n. Pengolahan sampah berarti suatu upaya untuk mengurangi volume sampah atau mengubah bentuk sampah menjadi sesuatu hal yang dapat bermanfaat seperti melalui proses pengomposan, daur ulang, pemadatan, pembakaran, penghancuran atau pengeringan.
- o. Pengomposan memiliki arti proses mengolah sampah organik hingga terbentuk pupuk organik dengan bantuan mikroorganisme.
- p. Pembakaran sampah merupakan suatu cara mengelola sampah dengan penggunaan api secara terkendali sehingga terjadi perubahan bentuk sesuai dengan ketentuan yang berlaku. Proses ini dapat dilakukan menggunakan insinerator.

- q. Pemadatan berarti usaha mengurangi volume sampah secara manual atau mekanik dengan cara memadatkan sampah dengan tujuan meningkatkan efisiensi dalam pengangkutan ke tempat pembuangan akhir.
- r. Daur ulang merupakan proses mengolah sampah hingga menghasilkan produk baru yang dapat dimanfaatkan kembali.
- s. Pembuangan akhir merupakan lokasi untuk mengisolasi sampah sehingga tidak merusak lingkungan.

Berdasarkan Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Republik Indonesia nomor 03/PRT/M/2013, beberapa hal yang perlu dipertimbangkan dalam perencanaan dan operasional pengelolaan persampahan, yaitu:

- a. Kepadatan atau jumlah penduduk.
- b. Daerah pelayanan dan tingkat pelayanannya.
- c. Teknik pewadahan, pengumpulan, pemindahan, pengangkutan dan pengolahan sampah yang tepat.

5. Aspek Keikutsertaan Masyarakat

Dalam pengelolaan persampahan, kerjasama antara pemerintah dan masyarakat perlu diperhatikan karena kebiasaan dan aspek sosial budaya masyarakat memengaruhi cara pandang masyarakat terhadap sampah termasuk memperlakukan sampah tersebut. Keikutsertaan masyarakat berbeda-beda di setiap lokasi. Beberapa contoh partisipasi masyarakat yang dapat dilakukan dalam mengelola persampahan, yaitu:

- a. Mengurangi volume sampah di sumber sampah
- b. Melakukan kegiatan *composting*
- c. Kampanye
- d. Retribusi

- e. Keikutsertaan memelihara kebersihan lingkungan sekitar

6. Aspek Pihak Swasta

Peran serta swasta khususnya di kota-kota besar sangat diperlukan terutama dalam penyediaan peralatan dan biaya pengelolaan persampahan serta sumber daya manusia. Beberapa proses pengelolaan sampah yang membutuhkan keikutsertaan pihak swasta, yaitu:

- a. Pengangkutan sampah dari sumber sampah ke lokasi pembuangan akhir sampah
- b. Penimbunan akhir sampah
- c. Proses daur ulang sampah

2.5 Faktor-Faktor yang Memengaruhi Sistem Pengelolaan Sampah Perkotaan

Berdasarkan Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Republik Indonesia Nomor 03/PRT/M/2013, beberapa factor yang memengaruhi sistem pengelolaan sampah perkotaan adalah sebagai berikut:

1. Karakteristik sampah.
2. Jumlah penduduk.
3. Kepadatan dan penyebaran penduduk.
4. Kebiasaan masyarakat.
5. Karakteristik lingkungan secara fisik, biologis, dan sosial ekonomi.
6. Peraturan-peraturan atau aspek legal nasional dan daerah setempat.
7. Sarana pengumpulan, pengangkutan, pengelolaan dan pembuangan.
8. Lokasi pembuangan akhir.
9. Biaya yang tersedia.
10. Rencana tata ruang dan pengembangan kota.

11. Iklim dan musim.

2.6 Pengolahan Sampah

Pengolahan sampah memiliki arti perubahan bentuk sampah menjadi bentuk yang lain seperti proses *composting* dimana mengubah sampah organik menjadi kompos sehingga dapat bermanfaat bagi tanaman bahkan menghasilkan energi yang lain (Tchobanoglous, 1993). Berikut ini beberapa cara mengubah atau mentransformasikan sampah menjadi bentuk lain, yaitu:

1. Transformasi fisik: cara ini mengubah volume sampah, mengubah densitas sampah melalui proses pemadatan.
2. Transformasi kimia misalnya pirolisis atau gasifikasi.
3. Transformasi biologis misalnya *composting*.

2.7 Beberapa Langkah dan Komponen Penting dalam Pengelolaan Sampah Perkotaan

Berikut ini adalah beberapa komponen penting dalam mengelola limbah padat perkotaan, yaitu:

2.7.1 Timbulan Sampah

1. Perkembangan Penduduk

Jumlah penduduk adalah salah satu komponen penting dalam perhitungan laju timbulan sampah pada suatu daerah. Beberapa hal yang perlu diperhatikan misalnya perhitungan proyeksi penduduk hingga tahun perencanaan yang ditentukan. Beberapa metode yang dapat digunakan untuk melakukan proyeksi jumlah penduduk adalah metode aritmatika, geometrik, dan eksponensial. Pertimbangan dalam pemilihan metode-metode tersebut adalah pertumbuhan penduduk dan karakteristik kota perencanaan.

2. Klasifikasi Daerah Pemukiman

Komponen ini merupakan salah satu pengumpulan data sekunder seperti kelas jalan, keteraturan tata letak bangunan bahkan kondisi sosial ekonomi.

3. Densitas Sampah

Densitas sampah berarti berat sampah yang diukur dibagi dengan volume sampah yang diukur biasanya dinyatakan dalam satuan kg/m^3 . Perhitungan densitas sampah sangat diperlukan untuk mengetahui jumlah timbulan sampah sehingga dapat menentukan luas lahan Tempat Pembuangan Akhir (TPA) secara tepat.

4. Jumlah Timbulan Sampah

Untuk memperoleh pengelolaan sampah secara efektif dan efisien, jumlah timbulan sampah perlu diketahui. Berikut ini beberapa bagian penting yang berkaitan dengan jumlah timbulan sampah antara lain:

- a. Selektivitas alat-alat seperti wadah, alat pengumpulan dan pengangkutan.
- b. Rancangan jalur pengangkutan.
- c. Sarana prasarana proses daur ulang.
- d. Luas dan jenis pembuangan akhir.

2.7.2 Faktor-Faktor yang Memengaruhi Jumlah Timbulan Sampah

1. Jumlah timbulan sampah dipengaruhi oleh pengurangan volume sampah (reduksi) di sumber sampah. Beberapa contoh reduksi tersebut antara lain:

- a. Mengurangi pemakaian bungkus atau *packaging*.
- b. Melakukan penggantian bahan yang bersifat sekali pakai ke berulang kali pakai seperti penggunaan sapu tangan, kotak makanan sendiri, piring, popok kain untuk bayi.
- c. Meningkatkan pemakaian bahan yang dapat didaur ulang dan *direuse*.

2. *Recycling*.
3. Kebiasaan masyarakat.
4. Peraturan pemerintah.
Peraturan ini terkait pengurangan pemakaian plastik, bentuk kemasan yang ramah lingkungan.
5. Fisik dan geografi.
Hal ini meliputi iklim, musim, atau daerah dataran tinggi.

2.7.3 Pewadahan Sampah

A. Tujuan pewadahan sampah

Pewadahan sampah berarti melakukan proses menampung sampah sebelum berakhir ke lokasi pembuangan akhir. Beberapa tujuan dari adanya pewadahan antara lain:

1. Menghindari tumpukan sampah yang berserakan dimana umumnya mengganggu lingkungan seperti aspek estetika, kesehatan, dan kebersihan.
2. Memudahkan proses pengumpulan sampah sehingga mengurangi risiko yang dapat membahayakan petugas pengumpul sampah.

Pewadahan sampah ialah langkah permulaan dari proses pengelolaan sampah. Berikut ini beberapa pola yang dapat dilakukan dalam proses pewadahan sampah, yaitu:

1. Wadah yang disediakan secara mandiri oleh masyarakat dengan model bebas.
2. Disediakan oleh masyarakat, namun pemerintah menetapkan model pewadahan sampah.
3. Disediakan pemerintah daerah.
4. Disediakan organisasi swadaya masyarakat setempat.

B. Klasifikasi wadah

Berikut ini beberapa klasifikasi wadah menurut mekanisme penggunaannya antara lain:

1. Tetap.
2. Semi tetap.
3. Tidak tetap.

C. Pola penampungan

Beberapa bentuk pola penampungan sampah yang dapat dilakukan dalam proses pewadahan sampah antara lain:

1. Individual

Dalam pola individual, masing-masing bangunan penghasil sampah seperti rumah atau toko mempunyai wadah sendiri. Pola ini dapat diterapkan di lokasi pemukiman kelas menengah atau atas, pertokoan, dan perkantoran.

2. Komunal

Pada pola komunal (terpusat), di lokasi tertentu disediakan satu wadah yang dapat dimanfaatkan oleh beberapa sumber sampah. Pola ini cocok diterapkan di lokasi yang sulit dalam proses pengumpulan seperti pemukiman kumuh dengan tingkat ekonomi rendah, rumah susun, dan pemukiman padat sekali (Peraturan Pemerintah Republik Indonesia nomor 81 tahun 2012).

D. Perencanaan pewadahan

Beberapa hal yang harus diperhatikan dalam perencanaan pewadahan antara lain:

1. Syarat bahan pewadahan
2. Kedap air dan tidak mudah rusak.
3. Mudah diperbaiki.
4. Ekonomis, mudah diperoleh atau dibuat masyarakat.

5. Mudah dan cepat dikosongkan.
6. Ukuran volume pewadahan
Hal-hal ini yang menjadi pertimbangan dalam menentukan ukuran volume pewadahan, yaitu:
 - a. Tingkat kehidupan masyarakat.
 - b. Jumlah anggota keluarga di masing-masing rumah.
 - c. Frekuensi pengambilan atau pengumpulan sampah.
 - d. Metode pengambilan sampah (manual atau mekanik).
 - e. Sistem pelayanan (individual atau komunal).
7. Lokasi pewadahan

Lokasi pewadahan individual dapat dilakukan di halaman muka (bagi sumber penghasil sampah kecil) atau bagian belakang lokasi (bagi sumber penghasil sumber sampah besar seperti hotel atau restoran). Lokasi pewadahan ini harus menjadi tempat yang mudah dalam proses pengambilan.

Sedangkan, untuk lokasi pewadahan terpusat dapat diletakkan di lokasi sedekat mungkin dengan sumber sampah, tidak dipinggir jalan protokol, dan di lahan yang tepat sehingga tidak mengganggu pengguna jalan dan memudahkan dalam pengoperasiannya.

2.7.4 Pengumpulan Sampah

1. Tujuan pengumpulan sampah

Pengumpulan sampah merupakan proses pengambilan sampah dari lokasi pewadahan atau penampungan sampah dimana terletak pada sumber timbulan sampah kemudian dibawa ke tempat pembuangan. Lokasi pembuangan dapat bersifat sementara (TPS) dengan sistem tidak langsung atau akhir (TPA) dengan sistem langsung. Berikut ini beberapa istilah

yang umumnya digunakan dalam proses pengumpulan sampah, yaitu:

- a. Mengumpulkan (*gathering*) atau mengambil (*pick up*) sampah dari sumber penghasil sampah.
- b. Mengangkut (*hauling*) sampah.
- c. Membongkar muatan (*unloading*).

2. Fungsi pengumpulan sampah

Pengumpulan sampah memiliki fungsi berupa segala peralatan dan fasilitas yang digunakan dalam proses pengumpulan sampah dari sumber penghasil sampah hingga ke lokasi pemindahan sementara. Pada umumnya, *hauling* dan *unloading* merupakan kegiatan serupa dalam kebanyakan sistem. Namun, dapat dijumpai secara beragam berdasarkan karakteristik fasilitas, jenis kegiatan, lokasi sumber penghasil sampah, kondisi jalan, dan jenis peralatan yang digunakan di lokasi penampungan sampah.

Berikut ini beberapa permasalahan yang dapat terjadi saat proses pengumpulan sampah antara lain:

1. Ketidakefisienan penggunaan waktu kerja contohnya keterlambatan awal mulai bekerja serta lamanya waktu yang diperlukan untuk memuat dan membongkar sampah.
2. Kelebihan kapasitas muatan pada waktu tertentu misalnya terlalu penuh pada rit pertama dan kosong pada rit berikutnya. Kelebihan muatan ini dapat merusak kendaraan pengangkut sampah.
3. Tipe pewardahan yang tidak tepat dan tidak sesuai standar yang berlaku sehingga memperlambat proses pengumpulan sampah oleh petugas sampah.
4. Jalur pelayanan yang belum optimum sehingga kurangnya penghematan waktu saat proses pengumpulan.
5. Tingkah laku petugas dan kerjasama masyarakat yang kurang baik.

6. Aksesibilitas yang kurang baik seperti jalan yang terlalu sempit, kondisi jalan yang rusak, kemacetan dan lain-lain.

Secara umum, terdapat dua acara dalam proses pengumpulan sampah antara lain:

1. *Door-to-door* (individual)

Proses ini dilakukan petugas kebersihan dengan mendatangi setiap bangunan penghasil sampah seperti rumah tangga. Daerah yang dilayani dengan sistem ini biasanya daerah yang memiliki lingkungan pemukiman teratur, daerah pertokoan, bangunan institusional atau tempat-tempat umum.

2. Komunal (terpusat)

Umumnya, daerah pelayanan proses ini adalah daerah pemukiman yang belum teratur (daerah kumuh), daerah yang bentuknya memanjang.

2.7.5 Pemindahan

- A. Fungsi pemindahan

Pemindahan berarti proses memindahkan sampah hasil pengumpulan ke dalam alat pengangkut. Beberapa fungsi lokasi pemindahan sampah, yaitu:

1. Mengurangi ketergantungan antara fase pengumpulan dan pengangkutan.
2. Memperbanyak jarak angkut alat pengumpul.
3. Memperpendek waktu pemindahan sampah ke truk pengangkut terutama pada sistem pemindahan berlangsung.
4. Penghematan bahan bakar truk sampah.

- B. Tipe pemindahan

Berikut ini tiga pengelompokan pemindahan sampah antara lain:

1. Transfer Station I (Transfer Depo)

2. Transfer Station II
3. Transfer Station III

2.7.6 Pengangkutan Sampah

Pengangkutan sampah merupakan aktivitas yang dilakukan dari lokasi pengumpulan terakhir dari alur pengumpulan hingga ke lokasi pembuangan akhir. Proses pengumpulan yang dilakukan biasanya dengan sistem individual langsung atau dari tempat pemindahan (Transfer Depo), penampungan sementara (TPS, LPS) atau tempat penampungan komunal sampai ke lokasi pengolahan atau pembuangan akhir (TPA).

Berbagai permasalahan yang biasanya terjadi dalam pengangkutan sampah antara lain:

1. Ketidakefisienan rute pengangkutan sampah.
2. Ketidakefisienan pemakaian jam kerja.
3. Kurang baiknya perilaku petugas.
4. Ketidaktepatan kapasitas sampah dalam kendaraan pengangkutan.
5. Aksesibilitas yang kurang baik.

2.7.7 Pembuangan Akhir Sampah

A. Penimbunan sampah

Pembuangan akhir sampah (*landfill*) dapat diartikan sebagai proses akhir untuk menimbun sampah. Dalam perencanaan, perancangan, dan pengoperasian tahap pembuangan akhir harus mempertimbangkan berbagai prinsip teknis, ilmu pengetahuan yang ada, dan bersifat ekonomis. Penimbunan *sanitary landfill* merupakan metode yang ekonomis dan aman bagi lingkungan. Berikut ini beberapa informasi tentang adanya *landfill* antara lain:

1. *Landfill* merupakan kawasan yang banyak ditemukan untuk menimbun limbah karena limbah akan dimasukkan ke dalam tanah.

2. Pada awalnya, *landfill* diaplikasikan pada sampah kota karena dalam pengaplikasiannya mempertimbangkan aspek sanitasi lingkungan berupa *sanitary landfill*.
3. *Landfill* sering dijumpai pengaplikasiannya karena biaya yang murah, mudah, dan dapat disesuaikan dengan kondisi yang ada (luwes).
4. Di kawasan industri, *landfill* sering menjadi pilihan untuk menimbun limbah yang dihasilkan seperti lumpur hasil pengolahan limbah cair.
5. Memiliki kekurangan dalam pengaplikasiannya karena lindi yang dihasilkan dapat mencemari air tanah. Namun, hal ini bisa dicegah dengan cara memilih lokasi yang sesuai, menyiapkan segala manajemen yang tepat di bidang prasarana, pengoperasian, dan teknologi. yang dibutuhkan dengan tepat serta penggunaan teknologi.

Beberapa alasan perlunya ketersediaan *landfill* antara lain:

1. Residu hasil pengolahan limbah harus ditangani secara cepat dan tepat.
2. Sulitnya pengolahan limbah jika limbah diolah secara biologis atau kimiawi (pembakaran).

B. Persyaratan lokasi pembuangan akhir sampah

Beberapa aspek yang perlu dipertimbangkan dalam memilih lokasi penimbunan, yaitu:

1. Kondisi geologi dan geohidrologi

Dalam pemilihan lokasi *landfill*, kondisi geologi dengan formasi batu gamping atau dolomit berongga dan batu pasir merupakan kondisi yang tidak sesuai. Selain itu, zona vulkanik dan daerah potensi gempa juga perlu dihindari. Namun, kondisi sedimen berbutir

halus seperti batu liat atau batuan beku merupakan kondisi yang layak untuk lokasi pembuangan akhir sampah.

Sedangkan, kondisi geohidrologi berupa sistem aliran air tanah *discharge* merupakan kondisi yang lebih baik untuk lokasi pembuangan akhir sampah dibandingkan *recharge*.

2. Topografi

Dalam aspek topografi, lokasi pembuangan akhir sampah yang tepat adalah berada pada lahan dengan lereng stabil, daerah yang tidak berair, lembah-lembah yang tinggi, jauh dari air permukaan, dan tidak berada pada lahan dengan kemiringan alami lebih dari 20%.

3. Kemudahan dalam pengoperasian.
4. Aspek lingkungan lainnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Landreth, R.E., & Rebers, P.A. 1996. *Municipal Solid Wastes: Problems and Solutions* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003075639>
- Reinhart, D.R. & Townsend, T.G. 1998. *Landfill Bioreactor Design and Operation*. Lewis Publishers, Boca Raton.
- Salvato, J. A., Nemerow, N. L., & Agardy, F. J. 2003. *Environmental Engineering*. Wiley.
- Scheirs, J. 2006. *Recycling of waste plastics. Pyrolysis and related feedstock recycling technologies: converting waste plastics into diesel and other fuels*. Wiley, Chichester. ISBN: 978-0470021521
- Tchobanoglous, G., Thiesen, H. & Vigil, S. A. 1993. *Integrated solid waste management: engineering principles and management issues*. McGraw-Hill, New York.
- Tchobanoglous, G., Burton, F., L., Stensel H. D., Metcalf & Eddy. 2003. *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. McGraw-Hill, New York.
- Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 81 Tahun 2012 Tentang Pengelolaan Sampah Rumah Tangga dan Sampah Sejenis Sampah Rumah Tangga
- Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Republik Indonesia Nomor 03/PRT/M/2013 Tentang Penyelenggaraan Prasarana dan Sarana Persampahan dalam Penanganan Sampah Rumah Tangga dan Sampah Sejenis Sampah Rumah Tangga

BAB 3

PENGOLAHAN LIMBAH PADAT

Oleh Nururrahmah Hammado

3.1 Pendahuluan

Saat ini, hampir seluruh kegiatan yang dilakukan oleh manusia sehari-hari menghasilkan limbah. Limbah merupakan sisa hasil kegiatan atau usaha yang di buang ke lingkungan karena dianggap tidak memiliki nilai guna lagi. Limbah yang tidak ditangani dengan baik akan menumpuk dan menyebabkan timbulnya permasalahan lain. Berdasarkan Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 Tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, limbah didefinisikan sebagai sisa hasil suatu usaha, dan/atau kegiatan atau sisa proses produksi yang telah mengalami perubahan fungsi dari awalnya (Indonesia, 2021).

Secara umum, limbah dapat dikelompokkan berdasarkan bentuk atau wujud, kondisi, sumber, dan senyawanya. Berdasarkan wujudnya, limbah dikelompokkan menjadi limbah padat, limbah cair, dan limbah gas. Bab ini membahas pengelompokan limbah padat serta cara pengolahannya.

3.2 Jenis Limbah

Aktifitas manusia sehari-hari merupakan salah satu penyumbang limbah terbesar di lingkungan. Perubahan pola dan gaya hidup manusia juga memberikan kontribusi besar terhadap peningkatan jumlah limbah yang ada di lingkungan. Jika hal ini dibiarkan begitu saja dapat menyebabkan keseimbangan alam terganggu dan lingkungan menjadi rusak. Limbah biasa juga disebut dengan sampah karena limbah merupakan sisa hasil

produksi atau kegiatan yang dianggap tidak memiliki nilai guna. Limbah dapat dikelompokkan berdasarkan wujud, sumber, dan sifatnya. Pengelompokan limbah berdasarkan wujudnya menurut (Savant et al., 2006), adalah:

1. Limbah padat, yaitu limbah yang memiliki wujud atau bentuk padat, baik kering atau basah, dan tidak dapat berpindah tempat kecuali dipindahkan.
2. Limbah cair, yaitu limbah yang wujud atau bentuknya cair, larut dalam air, dan dapat berpindah tempat dengan atau tanpa bantuan manusia.
3. Limbah gas, yaitu limbah yang wujud atau bentuknya gas (berupa asap), selalu bergerak bersama udara sehingga penyebarannya menjadi lebih luas.



Gambar 3.1. Tumpukan sampah anorganik dan organik di TPA
(Sumber : Dokumentasi pribadi, 2017)

Pengelompokan limbah berdasarkan sumbernya menurut (Fajar *et al.*, 2018), adalah:

1. Limbah rumah tangga atau biasa juga disebut limbah domestik, yaitu limbah yang dihasilkan dari aktifitas rumah tangga baik berupa limbah organik maupun anorganik. Menurut PP No. 81 Tahun 2012 tentang Pengelolaan Sampah Rumah Tangga dan Sampah Sejenis Sampah Rumah Tangga disebutkan bahwa sampah rumah tangga adalah sampah yang dihasilkan dari aktifitas sehari-hari dalam rumah tangga tetapi tidak termasuk tinja dan sampah spesifik (Presiden, 2012).
2. Limbah industri, yaitu limbah yang dihasilkan dari sisa proses produksi suatu industri. Limbah industri sangat beragam tergantung dari produksi yang dihasilkan oleh industri tersebut.
3. Limbah pertanian, yaitu limbah yang dihasilkan dari kegiatan pertanian. Contohnya adalah daun kering, jerami, ranting, kayu sisa penebangan pohon, atau ampas sisa produksi.



Gambar 3.2. Ampas sagu sisa hasil produksi tepung sagu yang dibuang ke lingkungan. (Sumber: Dokumentasi pribadi, 2017)

4. Limbah konstruksi, yaitu limbah sisa material yang digunakan dalam proses konstruksi, perbaikan, dan atau pembongkaran. Limbah yang dihasilkan dari pembongkaran, perobohan, atau penghancuran bangunan disebut **demolition waste**. Contoh limbah konstruksi adalah karung semen, bongkaran semen, atau kardus keramik, dan lain-lain.
5. Limbah radioaktif, yaitu limbah yang dihasilkan dari pemanfaatan tenaga nuklir, pembangkit listrik tenaga nuklir, atau kegiatan industri dan rumah sakit yang menggunakan tenaga nuklir. Menurut PP No. 61 Tahun 2013 tentang Pengelolaan Limbah Radioaktif disebutkan bahwa limbah radioaktif adalah zat radioaktif beserta bahan dan peralatan yang digunakan dan terkena zat radioaktif atau menjadi radioaktif karena instalasi nuklir yang dijalankan tidak dapat dipergunakan lagi (Muhammad, 2014).

Pengelompokan limbah berdasarkan sifatnya menurut (Fajar *et al.*, 2018), adalah:

1. Limbah mudah meledak (*explosive*), yaitu limbah yang dalam produksinya melalui proses kimia menghasilkan gas dengan suhu tekanan tinggi yang dapat merusak lingkungan. Misalnya limbah industri-industri proses kimia seperti kaporit, benzena, toluena, metana, dan lain-lain.
2. Limbah mudah terbakar (*flammable*), yaitu limbah yang dihasilkan dari proses produksi yang mudah menyala atau terbakar jika berdekatan dengan sumber api seperti percikan api, gesekan, atau sumber nyala lainnya dapat terbakar hebat dan dalam waktu yang singkat. Contoh limbah ini adalah limbah cat karena mengandung alkohol minimal 24% dari total volume.

3. Limbah reaktif, yaitu limbah yang mempunyai sifat mudah bereaksi dengan oksigen. Contoh limbah ini adalah limbah organik peroksida yang tidak stabil dalam suhu tinggi sehingga mudah menyebabkan kebakaran.
4. Limbah beracun (*toxic*) atau biasa disebut limbah B3, yaitu limbah yang mengandung racun yang berbahaya bagi manusia dan lingkungan. Jika limbah B3 masuk ke dalam tubuh makhluk hidup baik melalui pernafasan, kulit, atau mulut dapat menimbulkan keracunan akut hingga kematian. Contoh limbah jenis ini adalah pupuk kimia, pestisida, dan lain-lain.
5. Limbah korosif (*corrosive*), yaitu limbah yang dapat menyebabkan iritasi pada kulit dan korosi pada besi dan baja. Contoh limbah jenis ini adalah aki mobil yang tidak terpakai dapat menyebabkan terjadinya karat pada besi dan baja.
6. Limbah infeksius, yaitu limbah sisa kegiatan laboratorium yang telah terkontaminasi dengan penyakit atau terinfeksi dan mengandung kuman penyakit yang dapat menyebabkan penyakit tertular. Contoh limbah ini adalah jarum suntik bekas yang digunakan kembali.

3.3 Limbah Padat

Limbah padat adalah limbah yang paling banyak ditemukan di lingkungan, baik dalam bentuk limbah padat organik maupun anorganik. Limbah padat memiliki bentuk padat dan berasal dari sisa proses industri maupun sisa aktifitas manusia (*domestik*). Sedangkan definisi limbah padat menurut SNI 19-2454-2002 tentang Tata Cara Teknik Operasional Pengelolaan Sampah Perkotaan adalah limbah yang bentuk atau wujudnya padat dan berasal dari bahan organik atau anorganik yang dianggap tidak berguna lagi tetapi perlu dikelola agar tidak merusak lingkungan dan dapat melindungi pembangunan jangka panjang.

Limbah padat atau sampah yang berasal dari domestik maupun industri secara umum dapat dikelompokkan menjadi: sampah organik mudah membusuk (*garbage*), sampah anorganik, abu sisa pembakaran (*ash*), bangkai binatang (*dead animals*), sampah hasil sapuan (*street sweeping*), dan sampah sisa hasil industri (*industrial waste*). Limbah padat organik mengandung senyawa organik yang mudah diurai oleh mikroorganisme, antara lain karbon, nitrogen, hidrogen, dan oksigen. Limbah ini berasal dari sisa makanan, sayuran dan buah-buahan, bangkai binatang, potongan kayu, ampas hasil industri, dan lain-lain. Sedangkan limbah padat anorganik adalah limbah yang mengandung senyawa-senyawa logam dan sulit diurai oleh mikroorganisme di alam. Contoh limbah anorganik antara lain: kemasan plastik sekali pakai, kaleng bekas, besi, kertas dan kardus, baterai bekas, dan lainnya.



Gambar 3.3. Limbah padat anorganik
(Sumber: Unsplash.com, diakses 14 Juli 2023)

3.4 Pengolahan Limbah Padat

Limbah padat merupakan salah satu jenis limbah yang perlu mendapat perhatian khusus karena limbah padat paling banyak dihasilkan dari kegiatan manusia. Selain itu limbah padat, baik yang bersumber dari domestik maupun sisa hasil produksi industri yang dibuang ke lingkungan dapat menyebabkan kerusakan lingkungan karena jumlahnya yang akan menjadi timbulan sampah dan dapat menyebabkan pencemaran udara berupa bau busuk, pencemaran tanah, hingga pencemaran air tanah maupun air laut jika keberadaannya mencapai laut.

Menurut Undang-Undang Nomor 18 Tahun 2008, pengelolaan sampah merupakan suatu usaha dan kegiatan yang dilakukan secara sistematis, menyeluruh, dan berkesinambungan dan terdiri dari dua tahap, yaitu pengurangan dan penanganan sampah. Sampah yang dikelola adalah sampah rumah tangga, sampah sejenis rumah tangga, dan sampah spesifik (Indonesia, 2008). Pengurangan sampah berdasarkan undang-undang dijabarkan dalam bentuk kegiatan pembatasan timbulan sampah, daur ulang sampah, dan atau pemanfaatan sampah kembali. Sedangkan penanganan sampah dijabarkan dalam bentuk kegiatan (Sunarsih, 2014, Kahfi, 2017):

1. Pemilahan sampah dilakukan dengan cara mengelompokkan sampah padat basah dan sampah padat kering berdasarkan. Sampah kering seperti kertas bekas, kaleng, botol, atau plastik dikelompokkan lagi yang masih bisa digunakan kembali (*re-use*) atau di daur ulang (*recycle*). Pemilahan dimulai dilakukan di tingkat rumah tangga sebelum dibawa ke tempat pembuangan akhir.
2. Pewadahan. Setiap rumah tangga menyiapkan wadah sampah setelah melakukan pemilahan. Pewadahan sampah digunakan agar memudahkan dalam melakukan proses pengelolaan selanjutnya, serta sebelum pemindahan atau pengumpulan sampah di bawa ke tempat penampungan

- sampah sementara atau akhir. Wadah sampah yang digunakan sebaiknya tertutup, tidak mudah rusak, ekonomis dan dapat dipindahkan kemana saja dengan mudah.
3. Pengumpulan sampah dilakukan oleh petugas kebersihan yang ditunjuk untuk mengangkut sampah ke tempat pembuangan sampah sementara (TPS) atau tempat pembuangan akhir (TPA).
 4. Pengangkutan sampah dilakukan dengan cara mengambil sampah pada tempat-tempat pengumpulan sampah dengan menggunakan truk untuk kemudian dibawa ke tempat pemrosesan akhir.
 5. Pengolahan sampah dilakukan di tempat pemrosesan akhir dengan mengubah jenis dan jumlah sampah untuk kemudian dikembalikan ke lingkungan dengan aman.

Prinsip dasar yang dapat diterapkan dalam mengelola limbah padat berawal dari sumbernya hingga tiba di Tempat Pembuangan Akhir (TPA), yaitu:

1. Mencegah. Upaya ini dilakukan dengan menerapkan prinsip *zero waste* atau tidak menghasilkan limbah. Semua kegiatan yang dilakukan mengarah kepada produksi bersih dengan cara menerapkan teknologi bersih, mulai dari pengadaan bahan baku, mengolah bahan, proses produksi, pemasaran, hingga memanfaatkan kembali sisa hasil produksi. Hal ini diharapkan dapat meminimalisasi hingga tidak menghasilkan sampah dalam produksi bahan.
2. Mengurangi jumlah sampah. Jika prinsip mencegah sulit dilakukan, upaya selanjutnya adalah mengurangi jumlah sampah yang dihasilkan. Hal ini dapat dilakukan dengan cara memilih bahan yang menggunakan kemasan dapat didaur ulang, mengurangi jumlah energi yang digunakan, atau menggunakan teknologi bersih (minim limbah).

3. Menggunakan kembali (*re-use*). Upaya ini dilakukan dengan cara menggunakan kembali sampah yang dihasilkan, misalnya menggunakan kembali kantong kresek, kertas bekas dijadikan amplop atau kertas coretan, menggunakan kembali botol minuman, dan lain-lain.
4. Mendaur ulang (*re-cycle*). Upaya ini dapat dilakukan dengan mendaur ulang sampah menjadi produk yang sama atau produk lain. Misalnya mendaur ulang kembali kaleng-kaleng bekas minuman menjadi kaleng tempat uang, atau mendaur ulang kertas bekas menjadi kertas daur ulang (*recycled paper*) tisu, amplop, kardus, dan lain-lain.
5. Memperoleh kembali (*recovery*). Upaya ini dapat dilakukan dengan bantuan proses kimia, fisika, atau biologi. Misalnya mengolah sekam padi menjadi briket (*blocking*), mengolah ampas sagu menjadi biogas atau bioethanol, dan lain-lain.
6. Mengolah secara aman. Upaya ini dapat dilakukan melalui proses kimia, biologi, atau fisika. Misalnya membakar sampah dengan menggunakan incinerator, mengolah sampah organik menjadi pupuk kompos atau ecoenzyme, atau menimbun sampah dengan cara *sanitary landfill*.

Selain itu pengolahan limbah padat dapat dilakukan berdasarkan karakteristik limbah. Cara yang dapat dilakukan untuk mengelola limbah padat, antara lain:

1. Pengolahan secara fisik. Jenis limbah padat yang dapat diolah secara fisik adalah limbah padat organik. Perlakuan fisik yang dapat dilakukan adalah penghancuran limbah baik secara mekanis, pemanasan, atau pembakaran limbah (*insinerasi*).
2. Pengolahan secara kimia. Limbah padat yang dapat diolah secara kimia adalah limbah padat organik dan anorganik. Limbah padat organik seperti sekam padi diolah menjadi briket dan arang aktif, pati singkong dapat diolah menjadi

gula cair dengan proses hidrolisis asam (Fajri et al., 2022). Selain itu pengolahan limbah padat secara kimia dapat dilakukan dengan cara pengomposan (*composting*).

3. Pengolahan secara biologi. Pengolahan secara biologi adalah proses penguraian bahan-bahan organik yang terdapat dalam limbah dengan bantuan mikroorganisme. Proses yang terjadi dalam pengolahan secara biologi ada dua, proses aerob dan proses anaerob. Proses aerob adalah proses degradasi bahan organik yang dilakukan oleh mikroorganisme dengan bantuan oksigen. Sedangkan proses anaerob adalah proses degradasi bahan organik oleh mikroorganisme tanpa menggunakan oksigen. Hasil akhir proses pengolahan limbah padat organik secara aerob dapat berupa pupuk organik, kompos, *ecoenzyme*, dan lain-lain. Proses pengolahan limbah padat organik secara anaerob menghasilkan produk akhir berupa biogas, bioetanol, biodiesel, dan lain-lain.

Limbah padat yang dihasilkan dari kegiatan manusia perlu mendapat perhatian. Hal ini disebabkan jumlah limbah padat merupakan penyumbang terbesar polutan di lingkungan. Pemberlakuan UU No. 18 Tahun 2008 tentang Pengelolaan Sampah mendukung usaha manusia untuk mengelolah sampah yang dihasilkannya. Usaha pengelolaan sampah membutuhkan kesadaran semua pihak, mulai dari tingkat rumah tangga, hingga pemerintah sebagai pengambil kebijakan. Pengelolaah sampah juga merupakan rangkaian kegiatan yang sistematis dan berkelanjutan sehingga dapat mengurangi bahkan menurunkan tingkat pencemaran di lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- Fajar, M. I., Nadiroh, N. & Muzani, M. 2018. Kebijakan Pengelolaan Limbah Padat bukan Berasal dari Bahan Berbahaya dan Beracun melalui Re-Use atau Re-Cycling untuk Kelestarian Lingkungan Hidup. *Jurnal Green Growth dan Manajemen Lingkungan*, 7, 148-159.
- Fajri, M. S., Satrio, M. A., Utami, L. I. & Wahyusi, K. N. 2022. Produksi Gula Cair dengan Proses Hidrolisis Asam dengan Bahan Pati Singkong. *ChemPro*, 3, 58-64.
- Indonesia, P. R. 2008. Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 18 Tahun 2008 Tentang Pengelolaan Sampah. Jakarta.
- Indonesia, P. R. 2021. Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 tentang penyelenggaraan perlindungan dan pengelolaan lingkungan hidup. *In: INDONESIA*, S. N. R. (ed.). Jakarta.
- Kahfi, A. 2017. Tinjauan terhadap pengelolaan sampah. *Jurisprudentie: Jurusan Ilmu Hukum Fakultas Syariah dan Hukum*, 4, 12-25.
- Muhammad, S. Pengelolaan Zat Radioaktif Terbungkus Yang Tidak Digunakan Berdasarkan Peraturan Pemerintah Nomor 61 tahun 2013. Seminar Nasional Teknologi Pengelolaan Limbah XII, Serpong, 2014.
- Presiden, R. 2012. Peraturan Pemerintah Nomor 81 Tahun 2012 tentang Pengelolaan Sampah Rumah Tangga & Sejenis Sampah Rumah Tangga. Jakarta.
- Savant, D., Abdul-Rahman, R. & Ranade, D. 2006. Anaerobic Degradation of Adsorbable Organic Halides (AOX) from Pulp and Paper Industry Wastewater. *Bioresource Technology*, 97, 1092-1104.
- Sunarsih, E. 2014. Konsep Pengolahan Limbah Rumah Tangga dalam Upaya Pencegahan Pencemaran Lingkungan. *Jurnal Ilmu Kesehatan Masyarakat*, 5.

BAB 4

PEMANFAATAN TEKNOLOGI LIMBAH PADAT

Oleh Hafidawati

4.1 Pendahuluan

Pengelolaan limbah padat adalah langkah penting dalam menjaga keseimbangan lingkungan untuk melindungi kesehatan manusia. Pengelolaan limbah padat mencakup berbagai jenis limbah seperti limbah industri, limbah pertanian, limbah rumah tangga, dan limbah konstruksi. (Hussein, 2018). Tujuan pengelolaan limbah padat adalah untuk mengurangi jumlah limbah, mencegah pencemaran, dan mendaur ulang atau memanfaatkan kembali barang yang masih berguna.(Elsheekh, 2021).

Pengelolaan limbah padat biasanya mengandalkan tempat pembuangan akhir (TPA) sebagai metode utama dalam mengelola limbah padat, yang cenderung tidak ramah lingkungan dan dapat menyebabkan pencemaran tanah dan air. Namun, dengan kemajuan teknologi, ada cara yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan. diantaranya, daur ulang limbah padat untuk membuat bahan baku baru, pengomposan untuk membuat pupuk organik, dan pemanfaatan energi dari limbah melalui proses termal atau biogas. Dalam pengelolaan limbah padat, selain melakukan pengelolaan, upaya pencegahan juga menjadi fokus utama, dengan meningkatkan kesadaran masyarakat (Chaerul, 2007).

4.2 Limbah Padat

Limbah padat adalah bahan yang tidak terpakai yang bersumber dari berbagai aktivitas manusia, seperti industri, pertanian, dan rumah tangga. Limbah padat terdiri dari sisa makanan, sayuran, potongan kayu, dan ampas hasil industri. limbah padat mencemari tanah, air, dan udara, membahayakan lingkungan dan kesehatan disebabkan oleh penumpukan limbah padat yang tidak dikelola dengan baik. Limbah padat juga dapat berkontribusi pada penyebaran penyakit, merusak ekosistem, dan mempercepat perubahan iklim. Pembuangan limbah padat yang tidak terkendali ke Tempat Pembuangan Akhir (TPA) dapat mengakibatkan produksi gas rumah kaca seperti metana (CH₄) yang merupakan salah satu faktor penyebab perubahan iklim global.

Pemanfaatan limbah padat sangat penting karena dapat mengurangi dampak buruk ke lingkungan, memiliki manfaat sosial, dan ekonomi. Daur ulang, pengomposan, dan produksi energi dari limbah padat dapat mengurangi jumlah limbah yang dibuang ke lingkungan serta membantu membangun ekonomi sirkular yang berkelanjutan. Limbah padat dapat digunakan untuk berbagai tujuan, seperti daur ulang, membuat produk pupuk organik dari limbah padat, dan sebagai bahan baku industri. Membantu memperluas lapangan kerja daur ulang adalah salah satu keuntungan dari pemanfaatan sampah ini. Konversi menjadi barang yang menguntungkan seperti pupuk organik juga dapat menghasilkan keuntungan besar. Memanfaatkan limbah padat dapat mengurangi emisi gas rumah kaca, mengurangi konsumsi sumber daya alam baru, dan menjaga kelestarian lingkungan. Selain itu, pengelolaan sampah dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi terbarukan seperti biobriket atau biogas melalui pengolahan limbah padat lebih lanjut, yang dapat mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil.

4.3 Pemanfaatan Limbah Padat Dan Teknologi Pemanfaatan

Limbah padat dimanfaatkan untuk memberikan nilai tambah, bernilai ekonomis dan memberikan manfaat untuk masyarakat sekitar sumber limbah. Pengembangan teknologi telah dilakukan untuk beberapa limbah yang bersumber dari limbah pertanian, industri dan pemukiman.

4.3.1 Limbah Pertanian dan Perikanan

Limbah pertanian merujuk kepada sisa-sisa dan produk sampingan yang dihasilkan dari kegiatan pertanian yang meliputi berbagai material seperti sisa tanaman, kotoran ternak, limbah makanan ternak, dan bahan kimia pertanian yang tidak terpakai. Sisa tanaman dapat berupa batang, daun, dan akar yang tidak digunakan. Selain itu, kotoran ternak, seperti kotoran sapi, ayam, dan babi, juga merupakan limbah pertanian yang signifikan .

Limbah pertanian akan memberikan dampak negatif terhadap lingkungan jika tidak dikelola dengan baik, namun, limbah pertanian tersebut dapat juga dimanfaatkan secara produktif sehingga memberikan nilai secara ekonomis. Contohnya, limbah pertanian dapat diolah menjadi biosorbent yang berguna untuk mengurangi kandungan warna pada limbah, pupuk organik yang berguna untuk meningkatkan kesuburan tanah, selain itu, limbah pertanian juga dapat digunakan dalam produksi energi terbarukan, seperti biogas, yang dapat mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil. Contoh pemanfaatan dan teknologi yang digunakan diuraikan berikut ini,

1. Teknologi biosorben

Teknologi pemanfaatan menjadi biosorbent yaitu pemanfaatan limbah sebagai penyerap zat warna yang terkandung pada air limbah. Uraian teknologi mengacu kepada penelitian yang dilakukan oleh Ramadhani dkk (2019). Teknologi biosorpsi adalah proses yang menghasilkan adsorben yang berasal dari bahan-bahan alami (tumbuhan dan

hewan). Terdapat berbagai jenis biosorben yang berfungsi sebagai adsorben zat warna dalam perairan. Biosorben ini berasal dari limbah padat pertanian dan perikanan yang mudah diakses dan dapat digunakan sebagai pengganti karbon aktif komersial yang mahal untuk menghilangkan zat warna dari larutan berair.

Teknologi ini memaparkan perkembangan terkini pada aplikasi metode adsorpsi dalam menghilangkan zat warna dalam air limbah. Artikel ulasan ini memberikan informasi mengenai aplikasi zat warna serta penanganan limbah dari aktivitas industri yang menggunakan zat warna dan informasi mengenai penggunaan limbah padat pertanian dan perikanan sebagai penyerap berbagai jenis zat warna. Pengolahan limbah yang mengandung zat warna melalui adsorpsi menggunakan adsorben alternatif berbiaya rendah merupakan bidang yang saat ini berkembang dan banyak diminati karena memiliki manfaat yaitu untuk pengelolaan limbah cair dan pemanfaatan limbah padat organik.

Metode Penerapan Teknologi biosorben

Metode adsorpsi digunakan untuk menghilangkan zat warna dari air limbah. Ini adalah metode terkini untuk menangani limbah yang berasal dari aktivitas industri yang menggunakan zat warna. Metode ini dapat digunakan untuk limbah padat pertanian dan perikanan dan juga dapat digunakan untuk limbah cair dan limbah padat organik.

Proses biosorpsi merupakan Proses fisiko-kimia yang terjadi secara alami dalam biomassa tertentu. Proses ini terdapat dua fase yaitu fase padat (biosorben, adsorben, atau bahan alami) dan fase cair (pelarut). Fase cair mengandung spesies terlarut yang dapat diserap atau adsorbat, seperti zat warna dan logam yang memungkinkan kontaminan untuk berkonsentrasi secara pasif dan mengikatnya ke dalam

struktur seluler biomassa (Sharma dkk., 2014). Biosorpsi menggunakan bahan alami dari limbah pertanian dan perikanan, menjadikannya teknologi alternatif yang ramah lingkungan dan murah. Saat ini, bidang pengolahan limbah yang mengandung zat warna melalui adsorpsi dengan menggunakan adsorben alternatif yang murah dan populer.

2. Komposting dan Vermi kompos

Kompos merupakan teknologi pengolahan limbah pertanian yang cukup populer. Proses pembuatan kompos melibatkan penguraian bahan organik oleh mikroorganisme, menghasilkan pupuk organik yang kaya nutrisi. Kompos dapat digunakan untuk membantu meningkatkan kesuburan tanah dan mengurangi penggunaan pupuk (Latifah, 2014). Teknologi pembuatan kompos secara ringkas mengikuti tahapan dari pengumpulan bahan dan pencacahan dengan ukuran 25-30 cm. Kemudian ditumpuk setebal 30-50 cm dan kemudian ditabur kapur pertanian di atas kotoran ternak. Selanjutnya diatas permukaan kotoran ternak ditumpuk kembali potongan sisa tanaman secara merata. Pengomposan dipercepat dengan menggunakan aktivator yang akan mempercepat proses perombakan bahan organik (sisa tanaman).

Vermikomposting adalah teknologi pengolahan limbah pertanian dengan menggunakan cacing. Proses ini menghasilkan pupuk organik yang lebih berkualitas dan lebih cepat dibandingkan kompos biasa. Vermikompos juga efektif dalam mengurangi jumlah limbah pertanian dan menciptakan lingkungan yang lebih bersih.



Gambar 4.1. Vermikomposting dari Limbah Pertanian
(Sumber : Hermansyah, 2017)

Pengomposan menggunakan cacing tanah berbeda dengan pengomposan dengan mikroorganisme lain. Dengan metode vermikomposting ini limbah yang direduksi bisa mencapai 75% dibandingkan dengan kompos konvensional dan kompos yang dihasilkan lebih kaya nutrisi dengan mikroba yang baik (Sinha *et al*, 2010). Dan dengan penggunaan vermikompos juga dapat mengurangi kadar pestisida yang berlebihan pada tanah dalam ranah pertanian (Gomes dkk., 2011).

3. Bahan Bakar Alternatif co-Processing

Teknologi *Co-processing* adalah metode pemanfaatan limbah untuk menggantikan bahan baku mineral alam (*material recycling*) dan bahan bakar fosil (*energy recovery*). Limbah yang dapat digunakan dalam *co-processing* ini adalah limbah pertanian yaitu biomass seperti sekam padi, serbuk gergaji, kulit kacang, dll. (*zero waste*), dan limbah industri yaitu hazardous waste berupa ash yang dihasilkan bercampur dengan material *feed* menjadi clinker. Jenis limbah yang seringkali dimanfaatkan untuk proses *co-Processing* adalah

limbah biomass (sekam padi). Sekam padi dijadikan prioritas utama karena source yang tersedia sangat banyak dan melimpah, selain itu juga memiliki kalori yang cukup tinggi.

Penggunaan limbah biomass ini juga digunakan sebagai bagian dari proyek *Clean Development Mechanism* (CDM), yang kemudian akan diberikan sertifikasi pengurangan emisi (CER) oleh UNFCCC. Proses *co-processing* dapat mengurangi emisi karbon dioksida yang dihasilkan oleh pembakaran. (Gatot dan Rahadi, 2010).

4.3.2 Limbah Sampah Rumah Tangga

Limbah padat adalah limbah yang dihasilkan oleh setiap rumah tangga dari aktivitas sehari-harinya. Ini mencakup berbagai jenis sampah seperti sisa makanan, kertas, plastik, logam, kaca, dan tekstil. Jika tidak dikelola dengan baik, limbah padat ini dapat sangat besar dan berdampak buruk pada lingkungan.

Terdapat beberapa cara untuk mengelola sampah rumah tangga yang dimulai dari sumber hingga ke Tempat Pembuangan Akhir (TPA). Pemilahan sampah di sumbernya adalah metode yang umum digunakan dimana limbah padat akan dipisahkan menjadi berbagai kategori, seperti kertas, plastik, logam, organik (sisa makanan), dan sebagainya, kemudian dikirim ke lokasi pengolahan yang tepat, seperti pengomposan atau daur ulang, dari hasil pemilahan ini. Beberapa teknologi pengelolaan yang akan diuraikan untuk limbah rumah tangga adalah eksmecat.

1. Teknologi Eksmecat

Potensi limbah organik rumah tangga tidak dimanfaatkan dengan benar, dapat menyebabkan pencemaran lingkungan dan gangguan kesehatan masyarakat. Dengan menggunakan reaktor cacing tanah *Lumbricus rubellus*, limbah organik rumah tangga dapat digunakan untuk menghasilkan pupuk organik padat eksmecat, yang dapat menjadi solusi untuk masalah penanganan limbah organik.

Eksmecat adalah jenis pupuk organik berupa feces cacing tanah yang bertekstur halus dan subur.



Gambar 4.2. Eksmecat dari sampah organik limbah rumah tangga

Sumber : Mashur, (2020)

Teknik pengolahan cacing tanah *Lumbricus rubellus* ini mempunyai kemampuan untuk mengolah limbah organik menjadi eksmecat yang rata-rata 2,463 kg per kotak sarang, dengan penebaran cacing tanah padat 25 gram per kotak sarang, dan periode budidaya 40 hari.

2. Teknologi Biodrying

Bio-drying adalah proses mengelola fraksi organik sampah padat perkotaan dan rumah tangga (MSW) untuk mengurangi kadar air. Karena memungkinkan produksi energi, ini dapat digunakan sebagai metode pemulihan energi. Ini dilakukan untuk mendapatkan bahan bakar terbaik dan nilai kalor yang tinggi saat memproduksi briket (Santosa dan Soemarno, 2014).

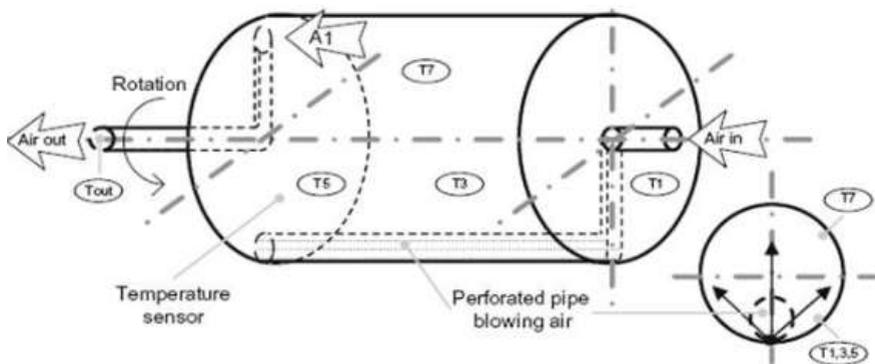
Teknik *biodrying* mengelola limbah padat secara desentralisasi dan memungkinkan limbah padat untuk mengalami proses biokonversi. Reaktor *biodrying* akan memproses limbah padat yang sudah dicacah dengan kadar air

tinggi, sehingga limbah padat kering ini dapat digunakan sebagai bahan bakar alternatif untuk batubara. Panas yang dihasilkan dari pemisahan aerobik bahan organik bersama dengan udara berlebih mengeringkan limbah padat. (Zaman, 2017).

Teknologi biodrying aerobik bertujuan untuk mempercepat penguapan dengan menggunakan energi yang dihasilkan dari degradasi bahan organik. Jika kadar air lebih tinggi daripada bahan organik biodegradable, panas yang dihasilkan tidak cukup untuk menguapkan air.

Beberapa proses yang melibatkan biokonversi mekanikal-biologikal limbah padat dan dikenal sebagai "pengering biologi". (Muller 2009). Teknologi seperti Mechanical Biological Treatment (MBT) dan Biological Mechanical Treatment (BMT) telah menjadi populer dalam beberapa tahun terakhir. Dengan menggunakan Teknologi biodrying memungkinkan pengolahan limbah padat dapat menyesuaikan dengan daya tampung lingkungan. Jumlah limbah padat yang didaur ulang dengan memisahkan bahan (seperti kaca, besi, logam, inert, dan non-logam besi) yang tidak terpisah di rumah sangat meningkat. Ini berarti bahwa jumlah limbah padat yang akan masuk ke TPA akan sangat berkurang. (Negoi 2009).

Proses biodrying akan berlangsung selama lima hari, dimana proses ini akan dapat meningkatkan pH menjadi basa dan mengurangi emisi NO₂ di udara. Saat ini, sebagian besar penelitian tentang proses biodrying berfokus pada metode ini. Sebagaimana ditunjukkan oleh Adani *et al.*(2002) dan Sugni *et al.* (2005). Gambaran proses biodrying dapat dilihat pada gambar 4.2.



Gambar 4.3. Proses Pengolahan Sampah Menggunakan Biodryng (Vellis dkk, 2009)

4.3.3 Limbah Industri Perkebunan

Industri perkebunan, seperti perkebunan kelapa sawit, sagu, karet, teh, dan kopi, menghasilkan limbah industri yang signifikan. Limbah industri yang signifikan berasal dari industri perkebunan seperti kelapa sawit, sagu, karet, teh, dan kopi. Limbah industri perkebunan terdiri dari berbagai bahan seperti tandan kelapa sawit yang tidak digunakan, serabut kelapa sawit, ampas dan kulit batang sagu, ampas tebu, kulit karet, daun teh, dan sisa biji kopi. Jika tidak dikelola dengan baik, limbah ini dapat berdampak buruk pada lingkungan.

Untuk mencapai keberlanjutan sektor perkebunan, pengelolaan limbah industri perkebunan sangat penting. Mengadopsi metode pengolahan dan pemanfaatan limbah yang efektif adalah salah satu cara untuk mengelola limbah ini. Pengolahan limbah dengan teknik seperti komposing, engomposan anaerobik, atau pengolahan termal dapat mengurangi polusi dan menghasilkan nilai tambahan.

1. Pengolahan Limbah Sagu Sebagai Kompos

Sagu dapat diolah menjadi berbagai jenis makanan bergizi yang disukai masyarakat. Sagu biasanya diambil patinya dan diproses menjadi tepung. Tepung sagu ini dapat digunakan untuk membuat bahan makanan, perekat, dan plastik yang secara alami dapat terurai. Peningkatan jumlah industri pengolahan tepung sagu akan sebanding dengan jumlah limbah yang diproduksi. Gas, cair, dan padat adalah tiga jenis limbah yang dihasilkan (Haedar & Jasman 2017; Sisriyenni *et al.*, 2017). Jenis limbah padat dari industri ini adalah berupa ampas, batang dan daun pelepah. Gambar limbah pengolahan sagu dapat dilihat pada Gambar 4.4 berikut :



Gambar 4.4. Limbah Pengolahan Sagu

Sumber : Istikowati dkk, (2022)

Limbah-limbah ini akan menjadi masalah bagi masyarakat jika tidak dimanfaatkan dengan baik karena mencemari lingkungan dan memerlukan tempat khusus untuk dibuang. Dalam proses pengolahan sagu untuk menghasilkan tepung sagu, hanya sekitar 48% pati yang dapat diekstrak sedangkan sisa berupa ampas sagu menjadi limbah (Nuraini, 2015). Limbah ampas sagu ini memiliki nilai yang berpotensi menjadi bernilai dengan melakukan pengolahan lebih lanjut, seperti menjadi pupuk organik, maupun briket arang sebagai sumber energi baru .

Teknologi pengolahan ampas sagu dengan pemanfaatannya sebagai pupuk orabik mengikuti tahapan, sesuai penelitian Zaqiyatunisa (2021),

Limbah padat dari ampas sagu yang dihasilkan selama proses produksi digunakan. Digunakan metode dekomposisi yang menggabungkan limbah padat ampas sagu dan kotoran kambing dengan aktivator mikroorganisme lokal. Solusi untuk masalah ini adalah membuat kompos dari limbah ampas sagu yang padat. Kemudian, kompos ini diuji pada parameter pertumbuhan tanaman.



Gambar 4.5. Kompos Blok dari Limbah Sagu
Sumber ; Christian Amar (2023)

Kompos ini ramah lingkungan dan dapat digunakan sebagai pengganti pupuk karena dapat menyuburkan tanah dan meningkatkan tingkat pertumbuhan tanaman.

2. Pengolahan Limbah Sagu Sebagai Briket Arang

Kulit batang sagu dapat digunakan sebagai bahan bakar alternatif yang ramah lingkungan untuk menggantikan bahan bakar fosil. Dalam bentuk briket, kulit batang sagu dapat digunakan sebagai pengganti limbah yang dihasilkan dari pengolahan pati. Ini karena, menurut Kiat (2006) dalam Nurmalasari dan Nur Afiah (2017), kulit batang sagu

mengandung selulosa 58,86% dan lignin 37,70%. Oleh karena itu, lignoselulosa adalah bahan utama yang diperlukan untuk membuat briket biomassa.

Selain kulit batang sagu, limbah ampas sagu juga berpotensi sebagai bahan baku pembuatan briket. Ampas sagu merupakan limbah padat hasil pengolahan pati sagu yang tersedia cukup banyak sepanjang tahun, murah dan mudah didapat dan memiliki nilai kalor yang memenuhi standar arang kayu Indonesia (SNI 06-3730-1995).. Ampas mengandung 65,7% pati dan sisanya merupakan serat kasar, protein kasar, lemak, dan abu. Dari persentase tersebut ampas mengandung residu lignin sebesar 21%, sedangkan kandungan selulosa di dalamnya sebesar 20% dan sisanya merupakan zat ekstraktif dan abu. Pada penelitian yang telah dilakukan oleh Agustinus dan La Ode Musa (2019) dan Hafidawati (2022), menghasilkan briket ampas sagu yang mempunyai nilai kalor sebesar 4120,0313 (kcal/kg) sampai dengan 4320,0727 (kcal/kg) dan telah dilakukan pengujian. Hasil pengujian membuktikan bahwa briket ampas sagu lebih efisien dibandingkan dengan minyak tanah. Hal ini ditunjukkan dari panas yang sangat tinggi dari bara briket ampas sagu sehingga lebih cepat mematangkan air pada saat pengujian. Gambaran Briket dari Ampas Sagu dapat dilihat pada Gambar 4.6 Briket Ampas Sagu



Gambar 4.6. Briket Bio arang Ampas Sagu
Sumber : Hafidawati, dkk (2023)

DAFTAR PUSTAKA

- Christian Amar. 2023. Mengubah Limbah Menjadi Harta: Pupuk Kompos Blok dari Ampas Sagu di Jayapura
- Hafidawati, Yenie E, Zahra.,H,Irfandi B.D, Agung, M,I.2023. Potential Study of Sago Dregs Waste as Renewable Energy Quality and Economic Value of Sagi Drefs Briquete Production. Sago Palm Vol.31 No 1, Juli 2023, The Society of Sago Palm Studies
- Istikowati W. 2022. Pemanfaatan Limbah Sagu Sebagai Media Tanam (Kompos Blok) Di Desa Pemakuan, Kabupaten Banjar, Kalimantan Selatan. Prosiding Seminar Nasional Pengabdian kepada Masyarakat p-ISSN 2656-502 Vol ume 4 Halaman 32-38 Maret 2022. LPPM. Universitas Lambung Mangkurat.
- Kiat LJ. 2006. Preparation and Characterization of Carboxymethyl Sago Waste and It`s Hydrogel [tesis]. Malaysia: University Putra Malaysia.
- Mardiana.,G dan Mahardika .,R. 2010. Prosiding Seminar Rekayasa Kimia dan Proses 2010. ISSN 1411-4216. Litbang dan Jaminan Mutu PT Gresik -Jawa Timur .
- Mashur, dkk. 2020. Gelar Teknologi Pengolahan Kotoran Sapi dan Limbah Rumah Tangga Menjadi Ekskat untuk Meningkatkan Pendapatan Masyarakat, Sasambo: Jurnal Abdimas (Journal of Community Service), Oktober, 2020 Tahun. Vol. 2, No.3.
- Ramadhani, P. Ddk. 2019. Pemanfaat Limbah Padat Pertanian dan Perikanan Sebagai Biosorben untuk Penyerap berbagai Zat Warna. Jurnal Zarah, Vol. 7 No 2 (2019) Halaman 46-56.
- Velis CA., Longhurst PJ., Drew GH., Smith R., dan Pollard SJT. Biodrying for mechanical–biological treatment of wastes: A review of process science and engineering. Bioresource Technology, 100: 2747-2761.

Zaqiyatunisa. 2021. Pemanfaatan limbah ampas sagu menjadi pupuk organik pada rumah produksi pati sagu berkelanjutan. Tugas akhir IPB.

BAB 5

PENGANTAR LIMBAH B3

Oleh Elsa Yuniarti

5.1 Pendahuluan

Sehubungan dengan pertumbuhan populasi, kemajuan teknologi, dan perubahan gaya hidup, membuat masalah sampah makin berkembang menjadi krisis nasional. Hal ini mempengaruhi jumlah volume dan jenisnya yang semakin bervariasi di setiap lokasi. Oleh karena itu, menghilangkan limbah memerlukan biaya tinggi dan jumlah lahan yang cukup besar. Selain itu, pengelolaan limbah yang tidak tepat dapat membahayakan kesehatan manusia dan lingkungan. Metode *end of pipe*, yang melibatkan pengangkutan sampah dari satu lokasi ke lokasi lain (TPS / TPA), adalah dasar untuk penanganan limbah yang telah dibuat selama ini. Bumi akan tertutup sampah dalam beberapa tahun jika praktik ini dibiarkan terus berlanjut. Masalah yang dihadapi banyak kota di seluruh dunia adalah limbah. Jumlah sampah terus meningkat karena jumlah penduduk dan aktivitasnya meningkat. Untuk memerangi pemborosan, dibutuhkan banyak uang dan ruang. Pengelolaan sampah berupaya untuk mencegah pencemaran lingkungan dan membahayakan kesehatan manusia yang disebabkan oleh sampah. Aliran limbah yang dikelola dengan benar dapat bermanfaat bagi manusia atau makhluk hidup lainnya (Muchsini dan Saliro, 2020).

Limbah adalah produk sampingan yang tidak diinginkan yang tersisa dari suatu prosedur. Proses yang dimaksud adalah proses aktivitas manusia. Termasuk Limbah padat, cair, dan gas semuanya . Emisi adalah limbah dalam bentuk gas dan terkait dengan polusi. Operasi industri menghasilkan sejumlah besar

sampah dalam keberadaan manusia. Limbah dapat dihasilkan oleh operasi penambangan, proses manufaktur, dan konsumsi selain industri. Hampir semua produk industri akhirnya terdegradasi menjadi sampah dalam jumlah yang sebanding dengan penggunaannya.

Sampah rumah, jenis sampah rumah tertentu, dan sampah tertentu merupakan sumber sampah atau sampah berdasarkan pengelolaannya, sesuai Undang-Undang Nomor 18 Tahun 2008. (Tidak termasuk kotoran dan sampah tertentu lainnya) Kegiatan domestik sehari-hari menghasilkan limbah rumah tangga. Lokasi komersial dan industri menghasilkan jumlah sampah rumah tangga yang sebanding. Bagian khusus, ruang komunal, ruang terbuka, dan fasilitas lainnya. Limbah spesifik termasuk limbah berbahaya dan beracun dari bencana, puing-puing pembongkaran bangunan, limbah yang secara teknologi tidak dapat diproses, dan limbah yang terjadi secara berkala dan memerlukan pengelolaan khusus karena sifat, konsentrasi, atau volumenya.

Sampah dapat dikategorikan menurut dari mana asalnya, termasuk 1) rumah tangga, yang biasanya menghasilkan sampah organik dan anorganik dari kegiatan sehari-hari termasuk memasak, berkebun, dan menggunakan peralatan rumah tangga 2) Area komersial yang diproduksi oleh perusahaan seperti toko, restoran, pasar, kantor, hotel, dan lainnya seperti kertas dan kemasan makanan 3) Lembaga berasal dari kantor pemerintah, rumah sakit, dan sekolah 4) Industri hasil dari proses produksi industri, yang meliputi pengolahan bahan baku 5) Taman umum, pantai, atau tempat rekreasi menyediakan fasilitas 6) Sisa konstruksi bangunan berasal dari penghancuran dan perbaikan jalan, jembatan, dan struktur lainnya 7) sisa dari pembuangan insinerator dan hasil pengelolaan air limbah 8) Pertanian terdiri dari produk pertanian yang ditinggalkan (Damanhuri dan Padmi, 2010).

5.2 Definisi Limbah B3

Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun (B3) merujuk pada limbah yang mengandung bahan-bahan yang dapat menimbulkan bahaya bagi manusia dan lingkungan. B3 dapat berasal dari berbagai sumber, termasuk industri, rumah tangga, pertanian, dan kegiatan lainnya. Pengelolaan limbah B3 sangat penting untuk menjaga kelestarian lingkungan, melindungi kesehatan manusia, dan mematuhi peraturan lingkungan yang berlaku.

Definisi limbah B3 secara umum adalah limbah yang memiliki sifat beracun, mudah terbakar, korosif (mengikis), reaktif (mudah bereaksi secara kimia), atau bersifat infeksius (mengandung mikroorganisme patogen). Limbah B3 dapat berupa bahan kimia, bahan berbahaya, bahan beracun, limbah medis, limbah pestisida, dan limbah lain yang memiliki karakteristik tersebut.

Limbah B3 mencakup beragam jenis bahan yang memiliki karakteristik tertentu. Beberapa sifat umum dari limbah B3 adalah sebagai berikut:

1. Sifat Berbahaya: Limbah B3 mengandung zat-zat atau bahan yang dapat menyebabkan bahaya langsung atau tidak langsung terhadap manusia, hewan, atau lingkungan. Contoh zat berbahaya adalah bahan kimia korosif (mengikis), bahan beracun, bahan radioaktif, atau bahan yang memiliki efek karsinogenik (penyebab kanker) atau mutagenik (penyebab mutasi genetik).
2. Sifat Beracun: Limbah B3 mengandung zat-zat atau bahan yang dapat menyebabkan keracunan atau efek negatif pada organisme hidup yang terpapar. Zat-zat beracun dalam limbah B3 dapat merusak organ tubuh, sistem saraf, sistem pernapasan, atau sistem peredaran darah, tergantung pada jenis dan tingkat kepekatan zat berbahaya tersebut.
3. Sifat Mudah Terbakar: Beberapa jenis limbah B3 memiliki sifat mudah terbakar atau mudah meledak jika terpapar panas atau

api. Limbah B3 yang mudah terbakar ini mencakup bahan-bahan seperti pelarut organik, minyak, bahan kimia reaktif, atau bahan yang mengandung gas mudah terbakar.

4. Sifat Korosif: Limbah B3 yang bersifat korosif memiliki kemampuan untuk mengikis atau merusak bahan seperti logam, beton, atau bahan konstruksi lainnya. Bahan kimia yang bersifat asam atau basa kuat sering kali termasuk dalam kategori limbah B3 yang bersifat korosif.

5.2.1 Sumber Limbah B3

Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun (B3) berasal dari berbagai sumber aktivitas manusia yang melibatkan penggunaan bahan kimia dan proses industri. Limbah B3 memiliki karakteristik berbahaya dan beracun yang dapat menimbulkan dampak negatif terhadap manusia, hewan, serta lingkungan jika tidak dikelola dengan baik. Untuk memahami pentingnya pengelolaan limbah B3, kita perlu mengetahui beberapa sumber utama limbah tersebut.

1. Industri: Industri merupakan salah satu sumber utama limbah B3. Berbagai jenis industri, seperti industri kimia, petrokimia, farmasi, elektronik, logam, dan lainnya, menggunakan bahan kimia berpotensi berbahaya dalam proses produksi mereka. Limbah yang dihasilkan dari kegiatan ini sering kali mengandung zat-zat beracun, bahan korosif, limbah berbahaya, atau limbah beracun lainnya.
2. Rumah Tangga: Limbah B3 juga dapat berasal dari rumah tangga dalam bentuk produk yang digunakan sehari-hari. Contohnya adalah limbah dari cat, pestisida rumah tangga, baterai, produk pembersih yang mengandung bahan kimia berbahaya, serta obat-obatan yang kedaluwarsa atau tidak terpakai. Jika tidak dibuang atau didaur ulang dengan benar, limbah rumah tangga ini dapat mencemari lingkungan dan berpotensi merusak kesehatan manusia.

3. **Layanan Kesehatan:** Sektor layanan kesehatan, seperti rumah sakit, klinik, laboratorium medis, dan fasilitas perawatan kesehatan lainnya, menghasilkan limbah medis yang termasuk dalam kategori B3. Limbah medis ini mencakup jarum suntik, peralatan medis sekali pakai, limbah yang terkontaminasi bahan biologis, bahan kimia medis, serta obat-obatan yang sudah kadaluwarsa atau tidak terpakai. Pengelolaan yang tepat diperlukan untuk mencegah penyebaran infeksi dan melindungi kesehatan petugas kesehatan dan masyarakat umum.
4. **Pertanian dan Hortikultura:** Limbah B3 juga dapat timbul dari sektor pertanian dan hortikultura. Penggunaan pestisida dan insektisida kimia dalam pertanian untuk mengendalikan hama dapat menghasilkan limbah yang mengandung bahan beracun. Selain itu, limbah dari proses pengolahan makanan atau pengolahan hasil pertanian juga bisa termasuk dalam kategori limbah B3 jika mengandung bahan berbahaya atau beracun.
5. **Transportasi dan Industri Otomotif:** Aktivitas transportasi dan industri otomotif juga dapat menghasilkan limbah B3. Oli bekas, baterai kendaraan, cat kendaraan yang mengandung bahan berbahaya, serta limbah dari proses perawatan kendaraan seperti pembuangan ban bekas atau limbah logam dari suku cadang kendaraan dapat termasuk dalam kategori limbah B3.

5.2.2 Klasifikasi Limbah B3

Untuk memudahkan pengelolaan limbah B3, limbah ini umumnya diklasifikasikan berdasarkan karakteristik dan sifat-sifatnya. Klasifikasi limbah B3 penting agar dapat mengidentifikasi dan mengelola limbah dengan benar sesuai dengan risiko yang terkait. Berikut adalah beberapa klasifikasi umum limbah B3:

Klasifikasi Berdasarkan Sifat Fisik dan Kimia:

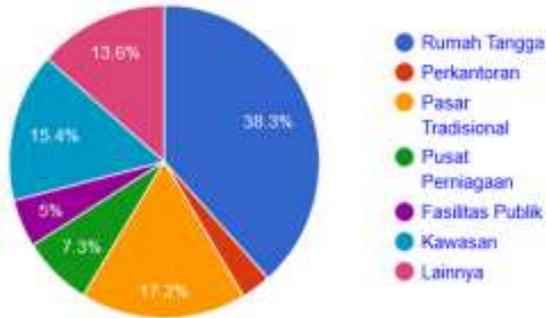
1. Limbah Korosif: Limbah yang memiliki sifat korosif atau mengikis bahan, seperti asam kuat (misalnya asam sulfat) atau basa kuat (misalnya natrium hidroksida).
2. Limbah Mudah Terbakar: Limbah yang mudah terbakar atau dapat menyebabkan kebakaran, seperti pelarut organik, minyak, bensin, atau bahan yang mengandung bahan bakar.
3. Limbah Beracun: Limbah yang mengandung zat beracun yang dapat menyebabkan keracunan, seperti logam berat (misalnya timbal, raksa) atau bahan kimia beracun (misalnya pestisida berbahaya, bahan pengawet).
4. Limbah Reaktif: Limbah yang memiliki sifat reaktif dan dapat menyebabkan reaksi kimia yang berbahaya, seperti bahan yang dapat meledak atau menghasilkan gas berbahaya saat terpapar ke air atau udara.

Klasifikasi Berdasarkan Sumbernya:

1. Limbah Industri: Limbah B3 yang dihasilkan dari berbagai proses industri, seperti industri kimia, petrokimia, elektronik, dan lain-lain. Limbah ini dapat mencakup limbah dari produksi, pemrosesan, atau pengolahan bahan kimia berbahaya.
2. Limbah Medis: Limbah B3 yang dihasilkan dari fasilitas layanan kesehatan, seperti rumah sakit, klinik, atau laboratorium medis. Limbah medis ini mencakup jarum suntik, peralatan medis sekali pakai, bahan kimia medis, dan limbah biologis yang terkontaminasi.
3. Limbah Pertanian: Limbah B3 yang berasal dari sektor pertanian, termasuk penggunaan pestisida dan insektisida kimia, limbah dari pengolahan makanan, serta limbah pertanian lainnya yang mengandung bahan berbahaya atau beracun.
4. Limbah Rumah Tangga: Limbah B3 yang dihasilkan dari rumah tangga, seperti cat, baterai, pestisida rumah tangga,

produk pembersih yang mengandung bahan kimia berbahaya, atau obat-obatan yang sudah kadaluwarsa.

Komposisi Sampah/Limbah Berdasarkan Sumbernya



Gambar 5.2. Presentase Limbah Tahun 2020

Sumber : Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan tahun 2020

Klasifikasi Berdasarkan Tingkat Bahayanya:

1. Limbah Berbahaya: Limbah B3 yang memiliki sifat berbahaya dan dapat menyebabkan bahaya langsung atau tidak langsung bagi manusia dan lingkungan.
2. Limbah Sangat Berbahaya: Limbah B3 yang memiliki tingkat bahaya yang lebih tinggi, seperti limbah radioaktif atau limbah yang mengandung bahan karsinogenik (penyebab kanker) atau mutagenik (penyebab mutasi genetik).

5.2.3 Pengelolaan Limbah B3

Di Indonesia, pengelolaan limbah B3 diatur oleh beberapa undang-undang dan peraturan yang relevan. Salah satu undang-undang utama yang mengatur pengelolaan limbah B3 adalah Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup (UU PPLH). UU PPLH menetapkan

prinsip-prinsip pengelolaan limbah B3 yang meliputi pemantauan, pengurangan, penanganan, pengangkutan, pengolahan, dan pemusnahan limbah B3 (Binilang, 2016).

Berikut adalah beberapa langkah penting dalam pengelolaan limbah B3:

1. Identifikasi dan Klasifikasi Limbah: Langkah pertama dalam pengelolaan limbah B3 adalah mengidentifikasi jenis limbah yang dihasilkan dan mengklasifikasikannya berdasarkan sifat fisik, kimia, dan bahaya yang terkandung di dalamnya. Dengan mengklasifikasikan limbah B3, kita dapat menentukan cara pengelolaan yang sesuai dan meminimalkan risiko yang terkait.
2. Pengurangan Limbah: Upaya pengurangan limbah B3 harus menjadi prioritas dalam pengelolaan. Dengan mengadopsi praktik-praktik yang lebih efisien dalam penggunaan bahan kimia berbahaya, memilih bahan yang lebih ramah lingkungan, dan meminimalkan pemborosan, limbah B3 dapat dikurangi secara signifikan. Pengurangan limbah juga dapat dicapai melalui proses pengolahan yang lebih efisien, penggunaan kembali, dan daur ulang limbah B3.
3. Penyimpanan yang Aman: Limbah B3 harus disimpan dengan aman dan sesuai dengan persyaratan peraturan yang berlaku. Penyimpanan yang benar melibatkan pemisahan limbah berdasarkan jenisnya, penggunaan wadah yang sesuai, dan label yang jelas untuk mengidentifikasi jenis limbah, bahaya yang terkandung, serta petunjuk penanganan yang tepat. Area penyimpanan harus dilengkapi dengan langkah-langkah keamanan, seperti sistem pengendalian kebocoran, penangkapan tumpahan, dan akses terbatas untuk mencegah kontaminasi dan kecelakaan.
4. Transportasi yang Aman: Limbah B3 harus ditangani dan diangkut dengan hati-hati sesuai dengan persyaratan hukum yang berlaku. Pemilihan metode transportasi yang tepat,

- penggunaan wadah yang sesuai, serta pengepakan dan pengikatan yang kokoh sangat penting untuk mencegah tumpahan, kebocoran, atau kontaminasi selama transportasi. Para pengemudi dan pekerja yang terlibat dalam pengangkutan limbah B3 harus dilengkapi dengan pelatihan yang memadai tentang penanganan dan keamanan limbah.
5. Pengolahan dan Pemusnahan yang Aman: Limbah B3 harus diproses atau dimusnahkan dengan cara yang aman dan sesuai dengan persyaratan yang berlaku. Pengolahan limbah B3 meliputi teknologi dan metode yang digunakan untuk mengurangi bahaya yang terkandung dalam limbah. Pengolahan dapat melibatkan pemisahan komponen yang berharga, pengolahan fisik, kimia, atau termal untuk mengurangi tingkat bahaya atau mengubah limbah menjadi bentuk yang lebih aman. Pemusnahan limbah B3 harus dilakukan dengan metode yang sesuai untuk menghindari dampak negatif terhadap manusia dan lingkungan.
 6. Pemantauan dan Pelaporan: Pengelolaan limbah B3 memerlukan pemantauan terus-menerus untuk memastikan kepatuhan terhadap regulasi dan prosedur pengelolaan. Pemantauan meliputi pengukuran dan pemantauan kualitas limbah, pengawasan terhadap proses pengolahan dan pemusnahan, serta pelaporan yang tepat kepada pihak berwenang. Pelaporan yang akurat dan terperinci diperlukan untuk mengawasi dan mengevaluasi kegiatan pengelolaan limbah B3 (Sood, 2019).

5.3 Pencemaran Limbah B3

Pencemaran limbah B3 menjadi salah satu masalah lingkungan yang memerlukan perhatian serius. Pencemaran limbah B3 terjadi ketika limbah berbahaya dan beracun dilepaskan ke dalam lingkungan tanpa pengelolaan yang memadai. Dampak dari pencemaran limbah B3 dapat merusak ekosistem,

mengganggu keseimbangan ekologi, dan membahayakan kesehatan manusia. Berikut adalah beberapa dampak yang diakibatkan oleh pencemaran limbah B3:

1. Pencemaran Udara: Beberapa limbah B3 menguap ke udara dan menyebabkan pencemaran udara. Gas beracun yang dihasilkan dapat mengiritasi saluran pernapasan, menyebabkan penyakit pernapasan, dan bahkan dapat bersifat karsinogenik. Pencemaran udara juga dapat menyebabkan asap beracun, kabut asam, atau fenomena polusi udara yang berdampak buruk pada kualitas udara dan mengganggu ekosistem.
2. Pencemaran Air: Limbah B3 yang tidak dikelola dengan baik dapat mencemari sumber air seperti sungai, danau, atau laut. Bahan kimia berbahaya dalam limbah B3 dapat mengubah kualitas air, mengganggu kehidupan akuatik, dan mempengaruhi organisme air, termasuk hewan dan tumbuhan air. Pencemaran air juga dapat berdampak buruk pada kesehatan manusia jika air yang terkontaminasi digunakan untuk minum, mandi, atau irigasi.
3. Pencemaran Tanah: Limbah B3 yang dibuang secara tidak tepat dapat mencemari tanah. Zat-zat beracun dalam limbah B3 dapat meresap ke dalam tanah dan mencapai sistem air tanah, mengancam sumber air minum yang penting. Pencemaran tanah juga dapat mengganggu kehidupan mikroba tanah dan mengurangi kesuburan tanah, sehingga berdampak pada pertanian dan ekosistem daratan.
4. Dampak terhadap Keanekaragaman Hayati: Pencemaran limbah B3 dapat mengganggu keanekaragaman hayati dan mengancam kelangsungan hidup spesies. Organisme yang terpapar limbah B3 berpotensi mengalami kerusakan genetik, mutasi, atau bahkan kematian. Hal ini dapat mengganggu rantai makanan dan mengganggu ekosistem secara keseluruhan (Rohim, 2023).

5.3.1 Contoh Kasus Pencemaran Limbah B3

Kasus-kasus pencemaran limbah B3 menjadi bukti nyata tentang perlunya pengelolaan yang efektif dan ketat terhadap limbah berbahaya. Dalam artikel ini, kita akan membahas beberapa contoh kasus pencemaran limbah B3 dan dampaknya.

1. Kasus Pencemaran Sungai Minamata, Jepang

Salah satu contoh yang terkenal adalah kasus pencemaran di Sungai Minamata, Jepang. Pada tahun 1950-an, perusahaan kimia melepaskan limbah merkuri ke sungai, yang berakibat pada kontaminasi air dan ikan di sekitarnya. Konsumsi ikan yang terkontaminasi menyebabkan penyakit serius yang dikenal sebagai Penyakit Minamata. Ribuan orang terinfeksi, mengalami kerusakan saraf, kecacatan, dan kematian. Kasus ini menyoroti bahaya limbah B3 dan mendorong perubahan dalam pengelolaan limbah di Jepang.

2. Kasus Bhopal, India

Kasus Bhopal di India adalah salah satu bencana industri terburuk yang terkait dengan limbah B3. Pada tahun 1984, kebocoran gas metil isosianat di pabrik pestisida Union Carbide menyebabkan kematian sekitar 4.000 orang dalam beberapa hari pertama, dan ribuan lainnya mengalami kerusakan kesehatan jangka panjang. Pencemaran limbah B3 dalam bentuk gas beracun tersebut memiliki dampak yang meluas pada populasi lokal dan lingkungan sekitarnya.

3. Kasus Pencemaran Sungai Citarum, Indonesia

Sungai Citarum di Indonesia merupakan salah satu contoh kasus pencemaran limbah B3 yang melibatkan industri tekstil dan pabrik pengolahan limbah. Limbah B3 berbahaya yang dilepaskan ke sungai menyebabkan air tercemar dengan bahan kimia beracun. Dampaknya adalah hilangnya kehidupan akuatik, keracunan bagi masyarakat yang bergantung pada sungai sebagai sumber air, dan kerusakan ekosistem yang signifikan.

4. Kasus Pencemaran Udara di Kota Mexicali, Meksiko

Di Kota Mexicali, Meksiko, kasus pencemaran udara terkait dengan limbah B3 telah menjadi perhatian serius. Industri seperti pabrik elektronik dan produsen baterai menggunakan bahan kimia berbahaya dan menghasilkan polutan udara yang berdampak buruk pada kualitas udara dan kesehatan penduduk setempat. Kondisi ini menyebabkan peningkatan risiko penyakit pernapasan, gangguan sistem saraf, dan masalah kesehatan lainnya pada penduduk di sekitar wilayah tersebut (Riyanto, 2013).

Dampak dari kasus-kasus pencemaran limbah B3 sangatlah serius. Masyarakat yang terpapar limbah B3 berisiko mengalami kerusakan kesehatan jangka pendek dan jangka panjang, seperti kerusakan saraf, keracunan, gangguan pernapasan, dan bahkan kematian. Selain itu, pencemaran limbah B3 juga merusak ekosistem, mengurangi keanekaragaman hayati, dan mempengaruhi sumber daya air yang penting bagi kehidupan. Kasus-kasus pencemaran limbah B3 ini menyoroti urgensi pengelolaan limbah yang baik, pengawasan yang ketat terhadap industri, serta perlunya peraturan yang tegas untuk mencegah pencemaran lingkungan. Melalui kesadaran akan dampak negatif dan tindakan pencegahan yang tepat, kita dapat melindungi lingkungan dan kesehatan manusia dari ancaman limbah B3 yang berbahaya.

DAFTAR PUSTAKA

- Binilang, B., P. 2016. Pengaturan Hukum tentang Pengelolaan Bahan Berbahaya dan Beracun (B3) Menurut Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2009. *Lex Et Societatis*, 4(7).
- Damanhuri, E., dan Padmi, T. 2010. Pengelolaan sampah. *Diktat kuliah TL*, 3104, 5-10.
- Muchsin, T., & Saliro, S. S. 2020. Peran Pemerintah Desa dalam Pengelolaan Sampah Perspektif Peraturan Daerah Nomor 2 Tahun 2015 Tentang Pengelolaan Sampah. *Jurnal Justisia: Jurnal Ilmu Hukum, Perundang-undangan dan Pranata Sosial*, 5(2), 72-90.
- Riyanto. 2013. *Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun (Limbah B3)*. Yogyakarta: Deepublish.
- Rohim, Miftahur. 2023. *Panduan Pengelolaan Limbah B3*. Cikarang: Michosan Center Indonesia.
- Sood, Muhammad. 2019. *Hukum Lingkungan Indonesia*. Jakarta: Sinar Grafika.
- Undang-undang (UU) Nomor 18 Tahun 2008 tentang Pengelolaan Sampah.
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. 2020. Komposisi Sampah Nasional Berdasarkan Sumber Sampah. <https://sipsn.menlhk.go.id/sipsn/>

BAB 6

DASAR-DASAR PROSES

PENGOLAHAN LIMBAH PADAT

Oleh Wayan Budiarsa Suyasa

6.1 Limbah Anorganik dan Limbah Organik

Limbah merupakan sisa dari suatu kegiatan yang mengandung bahan berbahaya bagi lingkungan dan kesehatan manusia. Limbah industri padat merupakan buangan dari hasil industri yang tidak digunakan lagi yang berbentuk padatan, lumpur maupun bubuk yang berasal dari sebuah proses pengolahan dan sampah yang dihasilkan dari kegiatan industri dan kegiatan lain di area industri tersebut. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan(KLHK) mencatat bahwa produksi sampah nasional mencapai 175 ribu ton per hari, rata-rata satu orang penduduk Indonesia menyumbang sampah sebanyak 0,7 Kg per hari. Indonesia bahkan menjadi negara yang membuang sampah plastik sekali pakai per kapita terbesar nomor enam di Asia Tenggara. Plastik merupakan jenis sampah yang sulit untuk terurai. Berbeda dengan limbah organik, limbah ini bukan berasal dari mahluk hidup. Sampah anorganik adalah sampah yang berasal dari bahan non hayati termasuk produk sintesis dan hasil proses teknologi pengolahan bahan tambang. Contoh sampah anorganik yaitu sampah logam dan produk olahannya, sampah plastik, kaca, keramik, dan detergen. Sebagian besar sampah non organik ini tidak bisa diurai oleh alam atau mikroorganisme. Perbedaan mendasar antara limbah anorganik dengan limbah organik yang dapat dilihat dari sumber, kandungan yang dimiliki, ketahanan terhadap panas, dan reaksi yang dihasilkan.

1. **Sumber:** Perbedaan yang pertama bisa dilihat dari sumbernya. Sampah organik berasal dari sisa-sisa organisme hidup baik manusia, hewan, atau tumbuhan. Sedangkan sampah anorganik berasal dari organisme tidak hidup
2. **Kandungan yang Dimiliki:** Sampah organik umumnya mengandung karbon dan ikatan hidrogen. Sampah organik juga mengandung komposisi yang lebih kompleks dibandingkan limbah anorganik. Sementara itu, sampah anorganik tidak memiliki kandungan karbon. Sampah ini memiliki materi tidak hidup dan mengandung mineral
3. **Ketahanan Panas:** Sampah organik mudah terbakar jika terkena panas. Berbeda dengan sampah anorganik yang lebih tahan panas.
4. **Reaksi yang Dihasilkan:** Sebuah penelitian menyebutkan bahwa sampah organik memiliki laju reaksi yang lambat dan tidak menghasilkan garam. Sedangkan sampah anorganik memiliki laju reaksi lebih cepat dan dapat membentuk garam.

Limbah anorganik dibagi menjadi dua jenis, yaitu limbah lunak dan limbah keras.

1. **Limbah Lunak Anorganik** Limbah lunak anorganik adalah limbah yang bersifat lunak atau lentur serta mudah dibentuk. Adapun contohnya yaitu sampah plastik, baik yang berbentuk kantong plastik, styrofoam, sedotan plastik, atau bungkus makanan cepat saji. Selain itu, ada juga limbah cair, seperti bekas air deterjen, sabun cuci, minyak goreng, dan sebagainya.
2. **Limbah Keras Anorganik** Kebalikan dari limbah lunak, limbah keras anorganik bersifat tidak mudah dihancurkan karena mengandung bahan yang kuat. Limbah ini hanya dapat dihancurkan dengan metode penghancuran tertentu,

pemanasan, atau pembakaran. Adapun contoh limbah keras, antara lain pecahan keramik, kaca, paku berkarat, dan bekas kaleng.

Selain kedua jenis limbah anorganik di atas, ada juga limbah anorganik gas atau angin yang tidak dapat terjamah oleh indra. Limbah jenis ini berasal dari cerobong asap pabrik-pabrik produksi yang berbahaya bagi kesehatan dan dapat mengakibatkan bumi semakin panas.

6.1.1 Pengolahan Limbah Anorganik

Pengelolaan limbah anorganik dapat dilakukan dengan menerapkan sistem 3R (reuse, reduce, dan recycle). Reuse berarti menggunakan kembali sampah anorganik yang masih bisa berfungsi. Reduce berarti mengurangi penggunaan barang sekali pakai. Sementara, recycle berarti mendaur ulang sampah anorganik menjadi benda-benda bermanfaat dan memiliki nilai baru. Beberapa tahapan yang bisa dilakukan saat mengelola sampah anorganik, berikut:

1. Mencegah dan Mengurangi Sampah dari Sumbernya: Mencegah dan mengurangi sampah dari sumbernya bisa dengan melakukan pemilahan atau pemisahan sampah organik dengan anorganik. Pemisahan tersebut bisa dilakukan dengan menyediakan tempat sampah khusus untuk setiap jenis sampah yang berbeda.
2. Pemanfaatan Kembali : Cara mengolah sampah anorganik berikutnya yaitu dengan memanfaatkan kembali produk tersebut. Misalnya dengan menggunakan kertas hasil daur ulang atau membuat aneka kerajinan dari sampah plastik.
3. Bank Sampah sebagai upaya mengurangi limbah anorganik : Bank sampah menjadi salah satu upaya pemerintah dalam mengurangi tumpukan sampah anorganik. Dengan berpegang pada prinsip 3R, kehadiran bank sampah

mampu memberikan peluang menabung sekaligus menjaga lingkungan dari dampak buruk limbah anorganik.

Teknik pengolahan limbah industri padat dapat berupa pengolahan secara fisik-kimia dan biologis, secara biologis umumnya berupa digester aerobik dan digester anaerobik.

1) Metode Pengolahan secara Fisik

Metode insinerasi atau pembakaran dapat diterapkan untuk memperkecil volume limbah B3. Namun saat melakukan pembakaran perlu dilakukan pengendalian agar gas beracun hasil pembakaran tidak mencemari udara. Pengolahan secara insinerasi bertujuan untuk menghancurkan senyawa B3 yang terkandung di dalamnya menjadi senyawa yang tidak mengandung B3. Insenerator adalah alat untuk membakar sampah padat, terutama untuk mengolah limbah B3 yang perlu syarat teknis pengolahan dan hasil olahan yang sangat ketat. Ukuran, desain dan spesifikasi insenerator yang digunakan disesuaikan dengan karakteristik dan jumlah limbah yang akan diolah. Insenerator dilengkapi dengan alat pencegah pencemar udara untuk memenuhi standar emisi.

Insinerasi mengurangi volume dan massa limbah hingga sekitar 90% (volume) dan 75% (berat). Teknologi ini bukan solusi terakhir dari sistem pengolahan limbah padat karena pada dasarnya hanya memindahkan limbah dari bentuk padat yang kasat mata ke bentuk gas yang tidak kasat mata. Proses insenerasi menghasilkan energi dalam bentuk panas.

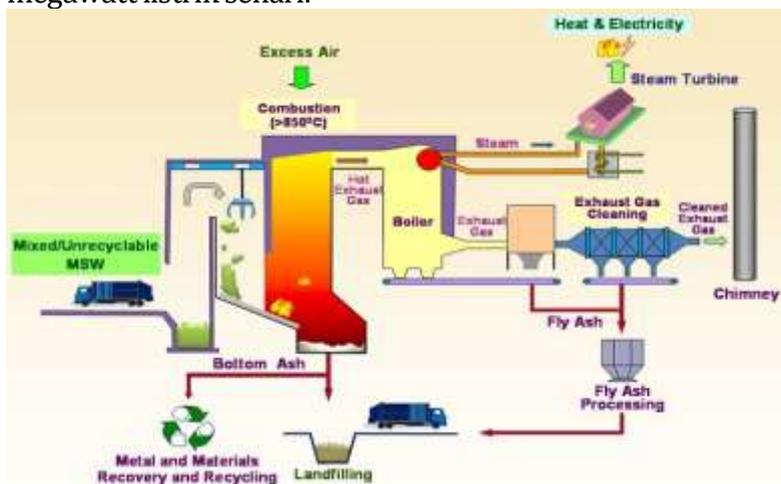
Insenerator dirancang secara umum untuk pembakaran oksidatif penuh dengan kisaran suhu 850 °C - 1.400 °C. Ini mungkin suhu di mana proses kalsinasi dan mencair juga dapat terjadi. Gasifikasi dan pirolisis merupakan perlakuan termal alternatif yang membatasi jumlah udara pembakaran utama untuk mengubah sampah menjadi gas proses, yang dapat digunakan sebagai bahan baku kimia atau

dibakar untuk pemulihan energi. Namun, dibandingkan dengan pembakaran, penerapan sistem ini masih rendah dan kesulitan operasional dilaporkan di beberapa instalasi.

Pada insinerasi oksidatif, konstituen utama dari gas buang adalah uap air, nitrogen, karbon dioksida dan oksigen. Tergantung pada komposisi bahan yang dibakar, kondisi operasi dan sistem pengendalian emisi gas buang dipasang, gas asam (sulfur oksida, nitrogen oksida, hidrogen klorida), partikulat (termasuk partikel terikat logam), dan berbagai senyawa organik yang mudah menguap, serta logam yang mudah menguap (seperti merkuri) yang dipancarkan. Pembakaran limbah padat perkotaan dan limbah berbahaya juga telah terbukti mengarah pada pembentukan yang tidak disengaja dan pelepasan polutan organik yang persisten (PCDD / PCDF, PCB, HCB). Selain itu potensi untuk melepaskan bifenil dibenzo-p-dioxin (PBDD) dan bifenil dibenzofuran (PBDF). Pembentukan senyawa tersebut biasanya meningkat secara substansial dalam instalasi yang dirancang atau dioperasikan dengan tidak sesuai ketentuan. Logam mudah menguap dan senyawa anorganik (misal; garam) seluruhnya atau sebagian akan menguap. Material tersebut berpindah dari input limbah ke gas buang dan fly ash. Residu mineral fly ash dan bottom ash akan terbentuk. Proporsinya tergantung dari tipe limbah yang masuk dan desain proses insinerasi. Residu dari pengolahan gas buang dan polishing, filter cake dari pengolahan air limbah, garam dan lepasan zat ke air limbah. Aktivitas pada instalasi insenerator limbah dapat dicirikan sebagai berikut: pengiriman limbah, penyimpanan, pretreatment, pemulihan insinerasi / energi, pengendalian emisi gas buang, residu padat manajemen, dan pengolahan air limbah.

Kelebihan metode pembakaran adalah metode ini merupakan metode hemat uang di bidang transportasi dan

tidak menghasilkan jejak karbon yang dihasilkan transport seperti pembuangan darat. Menghilangkan 10% dari jumlah limbah cukup banyak membantu mengurangi beban tekanan pada tanah. Rencana pembakaran waste-to-energy (WTE) juga memberikan keuntungan yang besar dimana limbah normal maupun limbah B3 yang dibakar mampu menghasilkan listrik yang dapat berkontribusi pada penghematan ongkos. Pembakaran 250 ton limbah per hari dapat memproduksi 6.5 megawatt listrik sehari.



Gambar 6.1. Flow Proses Insenerasi

Kerugian metode pembakaran adalah adanya biaya tambahan dalam pembangunan instalasi pembakaran limbah. Selain itu pembakaran limbah juga menghasilkan emisi gas yang memberikan efek rumah kaca.

Aspek penting dalam sistem insinerasi adalah nilai kandungan energi atau *heating value* limbah. Selain menentukan kemampuan dalam mempertahankan berlangsungnya proses pembakaran, heating value juga menentukan banyaknya energi yang dapat diperoleh dari

sistem insinerasi. Jenis insenerator yang paling umum diterapkan untuk membakar limbah padat B3 ialah *rotary kiln*, *multiple hearth*, *fluidized bed*, *open pit*, *single chamber*, *multiple chamber*, *aqueous waste injection*, dan *starved air unit*. Dari semua jenis insenerator tersebut, *rotary kiln* mempunyai kelebihan karena alat tersebut dapat mengolah limbah padat, cair, dan gas secara simultan.

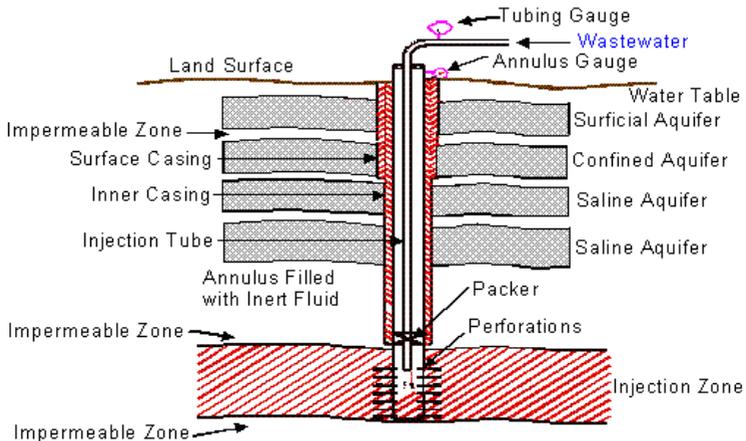
2) Metode Pengolahan secara Biologi

Proses pengolahan limbah B3 secara biologi yang berkembang dewasa saat ini dikenal dengan istilah bioremediasi dan fitoremediasi. Bioremediasi adalah penggunaan bakteri dan mikroorganisme lain untuk mendegradasi/ mengurai limbah B3. Sedangkan fitoremediasi adalah penggunaan tumbuhan untuk mengabsorpsi dan mengakumulasi bahan-bahan beracun dari tanah. Kedua proses ini sangat bermanfaat dalam mengatasi pencemaran oleh limbah B3 dan biaya yang diperlukan lebih murah dibandingkan metode kimia atau fisik. Namun, proses ini juga masih memiliki kelemahan. Proses bioremediasi dan fitoremediasi merupakan proses alami sehingga membutuhkan waktu yang relatif lama untuk membersihkan limbah B3, terutama dalam skala besar. Selain itu, karena menggunakan makhluk hidup, proses ini dikhawatirkan dapat membawa senyawa-senyawa beracun ke dalam rantai makanan di dalam ekosistem. Metode Pembuangan Limbah B3 meliputi sebagai berikut:

a. Sumur dalam atau sumur injeksi (*deep well injection*)

Salah satu cara membuang limbah B3 agar tidak membahayakan manusia adalah dengan memompakan limbah tersebut melalui pipa ke lapisan batuan yang dalam, di bawah lapisan-lapisan air tanah dangkal maupun air tanah dalam. Secara teori, limbah B3 ini akan

terperangkap di lapisan itu sehingga tidak akan mencemari tanah maupun air.



Gambar 6.2. Profil Sumur Injeksi

Pembuangan limbah B3 melalui metode ini masih menjadi kontroversi dan masih diperlukan pengkajian yang integral terhadap dampak yang mungkin ditimbulkan. Pembuangan limbah ke sumur dalam merupakan suatu usaha membuang limbah B3 ke dalam formasi geologi yang berada jauh di bawah permukaan bumi yang memiliki kemampuan mengikat limbah, sama halnya formasi tersebut memiliki kemampuan menyimpan cadangan minyak dan gas bumi. Hal yang penting untuk diperhatikan dalam pemilihan tempat ialah struktur dan kestabilan geologi serta hidrogeologi wilayah setempat.

b. Kolam penyimpanan atau Surface Impoundments

Limbah B3 cair dapat ditampung pada kolam-kolam yang diperuntukkan khusus bagi limbah B3. Kolam-kolam ini dilapisi lapisan pelindung yang dapat mencegah perembesan limbah. Ketika air limbah menguap, senyawa

B3 akan terkonsentrasi dan mengendap di dasar. Kelemahan metode ini adalah memakan lahan karena limbah akan semakin tertimbun dalam kolam, ada kemungkinan kebocoran lapisan pelindung, dan ikut menguapnya senyawa B3 bersama air limbah sehingga mencemari udara.

- c. Landfill untuk limbah B3 atau Secure Landfills
Limbah B3 dapat ditimbun pada landfill, namun harus dengan pengamanan tingkat tinggi. Pada metode pembuangan secure landfill, limbah B3 dimasukkan kedalam drum atau tong-tong, kemudian dikubur dalam landfill yang didesain khusus untuk mencegah pencemaran limbah B3. Landfill harus dilengkapi peralatan monitoring yang lengkap untuk mengontrol kondisi limbah B3 dan harus selalu dipantau. Metode ini jika diterapkan dengan benar dapat menjadi cara penanganan limbah B3 yang efektif. Metode secure landfill merupakan metode yang memiliki biaya operasi tinggi, masih ada kemungkinan terjadi kebocoran, dan tidak memberikan solusi jangka panjang karena limbah akan semakin menumpuk.

6.2 Pengolahan Biomassa

6.2.1 Gasifikasi Biomassa

Biomassa, sumber daya organik terbarukan, termasuk sisa tanaman pertanian (seperti brangkas jagung atau jerami gandum), sisa hutan, tanaman khusus yang ditanam khusus untuk penggunaan energi, limbah padat kota organik, dan kotoran hewan. Biomassa adalah sumber daya yang melimpah, yang tersedia lebih banyak daripada yang dibutuhkan untuk kebutuhan pangan dan pakan ternak. Sebuah laporan baru-baru ini memproyeksikan bahwa dengan peningkatan yang diantisipasi

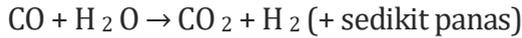
dalam praktik pertanian dan pemuliaan tanaman, hingga 1 miliar ton kering biomassa dapat tersedia untuk penggunaan energi setiap tahunnya. Sumber daya terbarukan ini dapat digunakan untuk menghasilkan hidrogen bersama produk sampingan lainnya melalui proses gasifikasi. Gasifikasi biomassa adalah jalur teknologi matang yang menggunakan proses terkontrol yang melibatkan panas, uap, dan oksigen untuk mengubah biomassa menjadi hidrogen dan produk lainnya, tanpa pembakaran. Karena menumbuhkan biomassa menghilangkan karbon dioksida dari atmosfer, emisi karbon bersih dari metode ini bisa rendah, terutama jika digabungkan dengan penangkapan, pemanfaatan, dan penyimpanan karbon dalam jangka panjang. Pabrik gasifikasi untuk biofuel sedang dibangun dan dioperasikan, dan dapat memberikan praktik terbaik dan pembelajaran untuk produksi hidrogen. Departemen Energi AS mengantisipasi bahwa gasifikasi biomassa dapat diterapkan dalam jangka waktu dekat. Gasifikasi adalah proses yang mengubah bahan karbon organik atau berbasis fosil pada suhu tinggi ($>700^{\circ}\text{C}$), tanpa pembakaran, dengan jumlah oksigen dan/atau uap yang terkontrol menjadi karbon monoksida, hidrogen, dan karbon dioksida. Karbon monoksida kemudian bereaksi dengan air untuk membentuk karbon dioksida dan lebih banyak hidrogen melalui reaksi pergeseran air-gas. Adsorber atau membran khusus dapat memisahkan hidrogen dari aliran gas ini.

Reaksi yang disederhanakan



Reaksi di atas menggunakan glukosa sebagai pengganti selulosa. Biomassa sebenarnya memiliki komposisi dan kompleksitas yang sangat bervariasi dengan selulosa sebagai salah satu komponen utama.

Reaksi pergeseran air-gas



Gasifikasi biomassa tanpa adanya oksigen disebut pirolisis. Secara umum, biomassa tidak menjadi gas semudah batu bara, dan menghasilkan senyawa hidrokarbon lain dalam campuran gas yang keluar dari gasifier; ini terutama benar bila tidak ada oksigen yang digunakan. Akibatnya, biasanya langkah ekstra harus diambil untuk mereformasi hidrokarbon ini dengan katalis untuk menghasilkan campuran gas hidrogen, karbon monoksida, dan karbon dioksida yang bersih. Kemudian, seperti dalam proses gasifikasi untuk produksi hidrogen, langkah reaksi pergeseran dengan uap mengubah karbon monoksida menjadi karbon dioksida. Hidrogen yang dihasilkan kemudian dipisahkan dan dimurnikan.

Pengolahan biomassa merupakan proses daur ulang karbondioksida. Tumbuhan mengkonsumsi karbon dioksida dari atmosfer sebagai bagian dari proses pertumbuhan alami mereka saat mereka membuat biomassa, mengimbangi karbon dioksida yang dilepaskan dari produksi hidrogen melalui gasifikasi biomassa dan menghasilkan emisi gas rumah kaca bersih yang rendah.

6.2.2 Biohidrogen

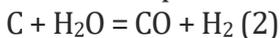
Gasifikasi merupakan salah satu proses konversi termokimia bahan bakar, seperti batubara, biomassa, dan limbah-limbah. Proses termokimia lainnya adalah pembakaran dan pirolisis (pembakaran tanpa oksigen). Pada gasifikasi, bahan bakar padat diubah menjadi gas (*gas producer*) yang dapat dibakar secara langsung sebagai bahan bakar maupun digunakan sebagai bahan baku untuk produksi gas sintetik atau hidrogen. Gasifikasi biomassa merupakan proses termokimia yang kompleks yang

meliputi sejumlah reaksi kimia elementer. Gasifikasi diawali dengan oksidasi parsial bahan bakar lignoselulosik dengan agen gasifikasi (misalnya udara, oksigen, uap air, atau CO₂). Kemudian, unsur volatil (volatile matter) akan dilepaskan ketika bahan bakar dipanaskan melalui oksidasi parsial dan menghasilkan produk-produk pembakaran H₂O dan CO₂. Air yang terkandung dalam biomassa akan menguap dan proses pirolisis berlanjut bilamana bahan tersebut terus dipanaskan. Penguraian termal dan oksidasi parsial gas-gas pirolisis terjadi pada suhu yang lebih tinggi dan menghasilkan CO, H₂, CO₂, CH₄, H₂O, gas hidrokarbon lainnya, tar, arang, unsur anorganik, dan abu. Gas yang dihasilkan dari proses gasifikasi umumnya berupa CO, H₂, CO₂, CH₄, H₂O, dan N₂. Selain itu, dalam gasifikasi juga akan dihasilkan bahan organik (tar) dan bahan anorganik (H₂S, HCl, NH₃, logam-logam alkali) serta partikel. Komposisi dari gas-gas hasil gasifikasi tergantung dari jenis dan komposisi umpan serta parameter operasi gasifikasi, seperti suhu, tekanan, dan agen gasifikasi (*gasifying agent*) persamaan reaksi untuk gasifikasi-uap tandan kosong sawit adalah :

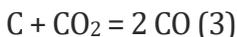


Pers.(1) merupakan persamaan umum gasifikasi-uap. Reaksi-reaksi selang biasanya berlangsung pada saat proses gasifikasi. Reaksi-reaksi selang tersebut adalah:

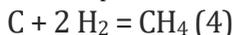
Gasifikasi uap



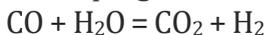
Reaksi Boudouard



Reaksi pembentukan metana (methanation reaction)



Reaksi pergeseran air-gas



Hidrogen dapat di produksi dari bahan bakar fosil, biomassa dan air baik dengan proses kimia maupun biologi. Secara biologi hidrogen dapat diproduksi dengan fotosintesis dan fermentasi dimana lebih ramah lingkungan dari pada proses thermo kimia dan elektro kimia. Dengan menggunakan kotoran sapi berpotensi sebagai bahan baku utama penghasil hidrogen karena pada hasil analisis didapatkan kadar selulosa sebesar 21.53%, hemiselulosa sebesar 27.76% dan lignin sebesar 16.03%. Komposisi kotoran sapi yang digunakan yaitu total padatnya 15%(w/w), cairan yang menguap 85% dari padatnya, total karbon 45% dari padatan, total nitrogen 2.5% dari padatan dan pH 6.6. Mikroorganisme yang mampu menghasilkan gas hidrogen yaitu genus *Clostridium* seperti *Clostridium butyricum*, *C. acetobutylicum*, *C. saccharoper butylaceticum*, *C. pasteurianum*. Spesies *Clostridium* adalah organisme anaerobic yang mampu mengkonversi heksosa menjadi hidrogen dengan hasil 2 mol hidrogen /mol heksosa. *Clostridium butyricum* mampu menghasilkan hidrogen dengan substratnya glukosa dan xilosa dengan hasil 2.0 dan 2.3 mol H₂/mol glukosa. *Clostridium butyricum* mampu merubah glukosa menjadi butirat, asetat, CO₂, dan hidrogen (A. E. Cioabla, et al. 2012). *Clostridium butyricum* memiliki karakteristik berupa gram positif pembentuk spora, bersifat anaerob obligat dan hidup di usus besar manusia dan hewan, serta tanah. Sebagai salah satu mikroflora dalam tubuh, *Clostridium butyricum* berperan dalam menghasilkan asam lemak rantai pendek (SCFA), terutama asam butirat, asetat dan propionat serta sejumlah asam format dan laktat (I. A. Zakarya, et al. 2014).

Produksi hidrogen dapat dihasilkan dengan proses biokimia menggunakan metode dark fermentasi (fermentasi gelap). Dark fermentasi merupakan proses yang terjadi dibawah kondisi anaerobik, yang mampu mengubah gula sederhana menjadi hidrogen. Dark fermentasi ini sangat dipengaruhi oleh jenis mikroorganisme yang digunakan dan suhu ruangan. Hasil

maksimal yang bisa di dapat secara teori untuk selulosa yaitu sebesar 4 mol H₂/mol glukosa pada proses fermentasi asam asetat. Dan pada kondisi fermentasi yang lain mengalami penurunan menjadi 2 molH₂/mol heksosa. (A. E. Cioabla, et.al. 2012). Dalam proses ini bakteri melakukan hidrogenase sebagai sarana mengoksidasi substrat yang berkurang selama fermentasi (S. Krishnan, *et al.* 2016).

6.2.3 Komposting

1) Proses Komposting

Kompos pada umumnya adalah bahan organik yang telah mengalami pelapukan sehingga terjadi perubahan bentuk. Kompos juga dapat diartikan yaitu hasil penguraian persial/tidak lengkap dari campuran bahan organik yang dapat dipercepat penguraiannya oleh populasi berbaai macam mikroba dalam kondisi lingkungan yang hangat, lembab, dan aerobik/anaerobik. Proses pengomposan yaitu proses biologis yang memanfaatkan mikroorganisme untuk mengubah material organik seperti kotoran ternak, sampah, daun, sayuran menjadi kompos, selain itu pengomposan juga bisa diartikan sebagai proses penguraian senyawa yang terkandung dalam sisa bahan organik dengan suatu perlakuan khusus.

Proses pembuatan kompos berlangsung dengan menjaga keseimbangan kandungan nutrisi, kadar air, pH, dan temperatur yang optimal melalui penyiraman dan pembalikan, pada tahap awal proses pengomposan, temperatur kompos akan mencapai 65 – 70 °C sehingga organisme patogen, seperti bakteri, virus dan parasit, bibit penyakit tanaman serta bibit gulma yang berada pada limbah yang dikomposkan akan mati dan pada kondisi tersebut gas-gas yang berbahaya dan baunya menyengat tidak akan muncul.

Pengomposan merupakan proses penguraian bahan organik atau proses dekomposisi bahan organik dimana didalam proses tersebut terdapat berbagai macam mikrobial yang membantu proses perombakan bahan organik tersebut sehingga bahan organik tersebut mengalami perubahan baik struktur dan teksturnya. Bahan organik merupakan bahan yang berasal dari makhluk hidup baik itu berasal dari tumbuhan maupun dari hewan. Adapun prinsip dari proses pengomposan adalah menurunkan C/N bahan organik hingga sama atau hampir sama dengan nisbah C/N tanah (<20), dengan demikian nitrogen dapat dilepas dan dapat dimanfaatkan oleh tanaman (I. A. Zakarya, et al. 2014). Tujuan proses pengomposan ini yaitu merubah bahan organik yang menjadi limbah menjadi produk yang mudah dan aman untuk ditangan, disimpan, diaplikasikan ke lahan pertanian dengan aman tanpa menimbulkan efek negatif baik pada tanah maupun pada lingkungan pada lingkungan. Proses pengomposan dapat terjadi secara aerobik (menggunakan oksigen) atau anaerobik (tidak ada oksigen) (L. Naik, et al. 2014). Pada dasarnya proses pengomposan secara aerobik lebih cepat dibandingkan dengan pengomposan secara anaerobik. Pada proses pengomposan dengan adanya oksigen akan menghasilkan CO₂, NH₃, H₂O dan panas, sedangkan pada proses pengomposan tanpa adanya oksigen akan menghasilkan prosuk akhir berupa (CH₄), CO₂, CH₃, sejumlah gas dan asam organik. Menurut (L. Naik, et al. 2014).

Proses penguraian bahan organik yang terjadi secara aerobik adalah sebagai berikut:

Gula, Selulosa, Hemiselulosa $(\text{CH}_2\text{O})_x + \text{XO}_2 \rightarrow \text{XCO}_2 + \text{X H}_2\text{O} + \text{Energi}$

Protein, N (organik) $\rightarrow \text{NH}_4^+ + \text{NO}_2^- + \text{NO}_3^- + \text{Energi}$

Organik Sulfur + XO $\rightarrow \text{SO}_2 + \text{Energi}$

Organik Phosphorus (Lesithin, phitin) $\rightarrow \text{H}_3\text{PO}_4 + \text{Ca}(\text{HPO}_4)_2$

Bahan organik $\xrightarrow{\text{Mikroorganisme}}$ Energi $\rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{Unsur hara} + \text{Humus} + \text{Energi}$

Proses penguraian bahan organik yang terjadi secara anaerobik adalah sebagai berikut:

$(\text{CHO})_x \xrightarrow{\text{Bakteri penghasil asam}} \text{XCH}_3\text{COOH}$

$\text{CH}_3\text{COOH} \xrightarrow{\text{Methanomonas}} \text{CH}_4 + \text{CO}_2$

N (organik) $\rightarrow \text{NH}_3$

$2\text{H}_2\text{S} + \text{CO}_2 \xrightarrow{\text{cahaya}} (\text{CH}_2\text{O}) + \text{S} + \text{H}_2\text{O}$

Sebelum membuat kompos ada beberapa hal yang perlu diperhatikan, yaitu komposisi bahan, reaksi kimiawi, tempat, waktu yang menunjang untuk proses pembuatan kompos tujuannya agar hasil kompos, didalam tumpukan bahan-bahan organik akan terjadi berbagai perubahan yang dilakukan oleh jasad- jasad renik dan perubahan tersebut dipengaruhi oleh beberapa faktor sebagai berikut:

- a. Susunan bahan : Jika bahan kompos merupakan campuran dari berbagai macam bahan tanaman, proses penguraiannya relatif lebih cepat dari bahan yang berasal dari tanaman sejenis.
- b. Ukuran bahan : Semakin kecil ukuran potongan bahan asalnya, semakin cepat proses penguraian bahan, ukuran

ideal potongan bahan mentah sekitar 4 cm, jika potongannya terlalu kecil, tumpukan menjadi padat sehingga tidak ada sirkulasi udara.

- c. Suhu optimal : Proses pengomposan berlangsung optimal pada suhu 30 – 45 °C.
- d. Derajat Keasaman atau pH pada tumpukan kompos : pH selama pengomposan menunjukkan nilai pH awal sampai hari ke 15 berkisar antara 6,5 – 6,8, setelah hari ke 15 sampai ke 21 nilai pH meningkat menjadi 7. Perubahan pH kompos berawal dari pH agak asam karena terbentuknya asam-asam organik sederhana, kemudian pH meningkat pada inkubasi lebih lanjut akibat terurainya protein dan terjadinya pelepasan ammonia.
- e. Kandungan air dan oksigen (O₂) : Kandungan kadar air mentah idealnya 50 – 70%. Jika tumpukan kompos kurang mengandung air maka bahan akan bercendawan. Hal ini merugikan, karena proses penguraian bahan berlangsung lambat dan tidak sempurna, aktifitas perombakan bahan organik secara aerob memerlukan oksigen karena itu, untuk memaksimalkan proses pengomposan, pembuatan lubang didasar komposter dapat membantu sirkulasi udara terjaga.
- f. Kandungan nitrogen (N) : Semakin banyak kandungan senyawa nitrogen, semakin cepat bahan terurai karena jasad-jasad renik memerlukan senyawa N untuk perkembangannya.
- g. C/N ratio :Perbandingan jumlah karbon (C) dengan nitrogen (N) dalam satuan bahan. Idealnya, perbandingan C dan N dalam proses pengomposan adalah 25 : 1 hingga 30 : 1, jika salah satu berlebih, maka proses pengomposan akan berlangsung lebih lama, juga berimplikasi pada kompos yang dihasilkan.

2) Bahan Baku Kompos

Bahan baku kompos sebaiknya dipilih dan dicampur dalam proporsi tepat untuk menghasilkan kompos yang berkualitas. Pada tabel 6.1 ditunjukkan persyaratan bahan dengan karakteristiknya.

Tabel 6.1. Karakteristik persyaratan bahan kompos

Karakteristik bahan	Rentangan	
	Baik	Ideal
C/N ratio	20 : 1 - 40 -1	25 : 1 - 30 : 1
Kandungan air	40 - 60 %	50 - 60 %
Konsentrasi oksigen	>5%	≥5%
Ukuran partikel (inci)	1 inci	bervariasi
pH	5,5 - 9	6,5 - 8,5
Densitas (kg/m ³)	<0,7887	-
Temperatur (°C)	43 - 65,5	54 - 60

2) Inokulum

Inokulum merupakan bahan yang dapat mengandung pro maupun pre biotik yang digunakan untuk mempercepat proses pengomposan. Dalam pengomposan terdapat kelompok utama yang berperan pada proses pengomposan adalah

- a. Bakteri : Bakteri adalah organisme sederhana dan kecil yang sering juga dengan tumbuhan berklorofil. Karena ukurannya kecil bakteri ini hanya bisa dilihat dengan melalui mikroskop. Besar kecilnya bakteri ini tergantung pada keadaan medium dan umur bakteri. Dalam pengomposan, jumlah bakteri paling banyak dibandingkan dengan kelompok mikroba lainnya. Pasalnya bakteri bisa lebih cepat mengubah bahan organik menjadi kompos dibandingkan dengan mikroba lainnya.

- b. *Actinomycetes* : Aktinomycetes sering juga disebut aktinomisit. Aktinomisetes akan berkembang membentuk filament seperti jamur. Ukurannya kecil dan struktur selnya rumit menyebabkan dikelompokkan menjadi bakteri. Bersifat aerob, cenderung terlihat tumbuh lebih jelas setelah senyawa kimia dipecah menjadi rendah dan tahan terhadap asam, berbentuk memanjang, berkembang biak membelah diri, tubuh mempunyai pigmen serta membutuhkan angin, hujan, dan air seperti halnya bakteri.
- c. Jamur : Jamur merupakan organisme yang lebih besar dan ukurannya bervariasi. Jamur tidak mempunyai klorofil tapi mempunyai miselium. Jamur memiliki kemampuan hidup pada pH rendah tetapi kurang tahan pada kondisi defisit oksigen. Spesies jamur yang berkaitan dengan pengomposan dapat menyebabkan reaksi alergi pada orang-orang tertentu bahkan bisa sampai komplikasi.

3) Metode Pengomposan

Dalam proses pembuatan kompos ada banyak metode, antara metode satu dengan yang lain tidak banyak berbeda, karena metode tersebut hanya merupakan modifikasi dari metode lain. Berikut beberapa metode yang dapat digunakan.

- a. Pengomposan berdasarkan kesediaan udara
Umumnya metode ini dibagi dua cara yaitu aerobik dan anaerobik, proses pengomposan aerobik membutuhkan udara dari luar. Karena itu proses ini perlu dilakukan aerasi dan aerasi ini bisa dengan dua cara yaitu aktif dan pasif. Aerasi pasif adalah cara pengaliran udara tanpa menggunakan alat bantu jadi udara masuk kedalam proses pengomposan melalui

beda tekanan antara luar dan dalam di timbunan bahan baku kompos, aerasi aktif dilakukan dengan menggunakan tekanan yang umumnya berasal dari mesin. Sedangkan proses pengomposan secara anaerobik merupakan modifikasi biologis pada struktur kimia dan biologi bahan organik tanpa kehadiran oksigen. Proses ini merupakan proses yang dingin dan tidak terjadi fluktuasi temperatur seperti yang terjadi pada proses pengomposan secara aerobik. Namun, pada proses anaerobik perlu tambahan panas dari luar sebesar 300 °C.

b. Pengomposan dengan penutup

Teknik ini dilakukan dengan cara menutup permukaan timbunan, baik menggunakan plastik, terpal ditempat pengomposan dan di sarankan untuk permukaan 2m, tinggi 1,5m. Jadi sejak awal semua bahan dicampur dan ditutup dengan terpal sampai selesai. Namun dapat juga dengan cara pencampuran berkala dengan penambahan air dan pengadukan selama proses pengomposan.

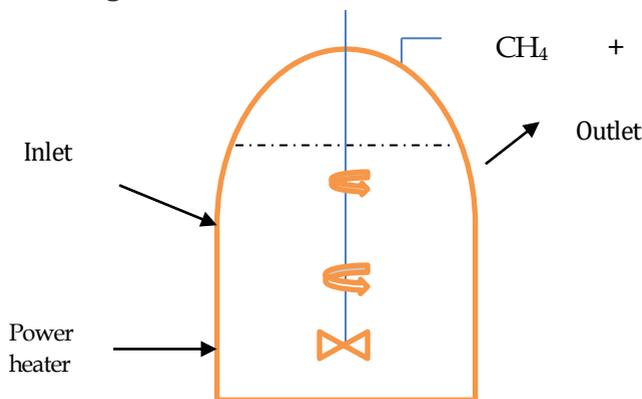
Kompos dikatakan bagus dan siap digunakan jika tingkat kematangannya sempurna. Kompos yang matang bisa dikenali dengan memperhatikan keadaan bentuk fisik meliputi jika diraba suhu tumpukan bahan yang dikomposkan sudah dingin, Tidak mengeluarkan bau, Bentuk fisiknya menyerupai tanah busuk lagi, Jika dilarutkan ke air tidak akan larut dan Strukturnya lemah dan tidak menggumpal (R. Ganesh, *et al.* 2014)).

6.3 Digester Anaerobik

Degradasi anaerobik bahan organik oleh bakteri-bakteri anaerobik dalam lingkungan bebas oksigen yang menghasilkan biogas. Proses pembuatan biogas dilakukan secara fermentasi

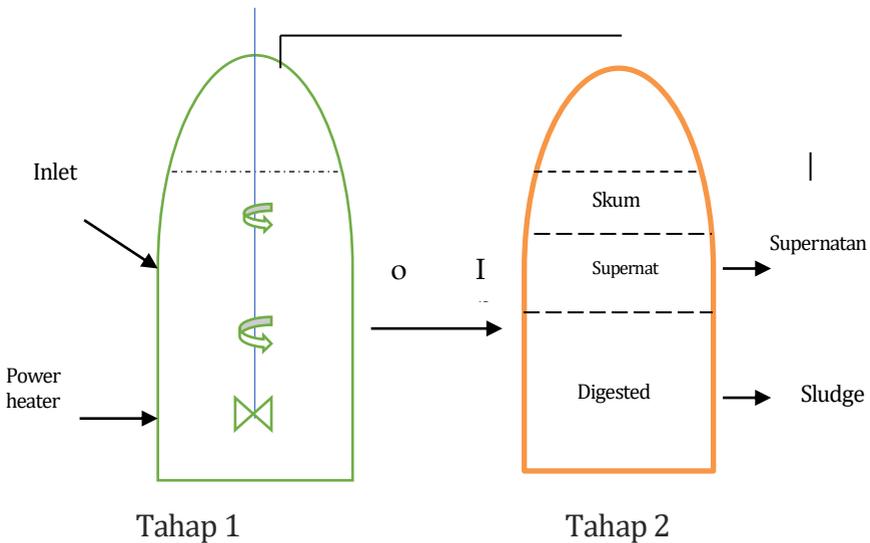
yaitu proses terbentuknya gas metana dalam kondisi anaerob dengan bantuan bakteri anaerob di dalam suatu digester sehingga akan dihasilkan gas metana (CH_4) dan gas karbon dioksida (CO_2) yang Volumnya lebih besar dari gas hidrogen (H_2), gas nitrogen (N_2) dan asam sulfida (H_2S). Proses fermentasi memerlukan waktu 7 sampai 10 hari untuk menghasilkan biogas dengan suhu optimum 35°C dan pH optimum pada range 6,4 – 7,9.

Degradasi anaerobik dapat berupa digester satu tahap dan digester dua tahap. Digester satu tahap meliputi pencampuran bahan dalam suatu wadah dengan tidak memisahkan skum dan supernatannya, dihangatkan untuk mencapai suhu optimal. Proses penambahan bahan dilakukan secara teratur dalam rentang 30 menit hingga 2 jam. Produksi biogas pada skala rumah tangga umumnya menggunakan teknologi fermentasi anaerobik di dalam satu biodigester (satu tahap). Digester dua tahap utamanya pembentukan biogas yakni tahap asetogenesis dan tahap metanogenesis. Permasalahan yang muncul dari penggunaan digester biogas satu tahap adalah ketidakseimbangan proses fermentasi dengan peningkatan laju beban organik, waktu retensi senyawa organik yang lebih cepat, dan produktivitas biogas yang menjadi kurang maksimal.



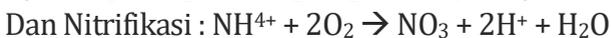
Gambar 6.3. Digester satu tahap

Biogas merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang murah dan berkategori non-polusi. Kebutuhan untuk memonitor serta mengontrol plant biogas bertambah seiring kebutuhan mengoptimalkan stabilitas proses untuk mendapatkan performansi yang tinggi. Monitoring biogas dapat memberikan gambaran keseluruhan proses pembangkitan biogas dan digunakan untuk memprediksi proses fermentasi yang berlangsung. Selain itu, dapat pula meminimalkan gagalnya proses fermentasi dan menghasilkan biogas secara optimal.



Gambar 6.4. Digester 2 tahap

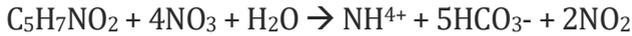
Biomassa dalam limbah yang merupakan beban yang harus didegradasi direpresentasikan dengan formula $C_5H_7NO_2$ dengan perubahan biokimia pada digester aerobik sebagai berikut:



Dengan reaksi lengkapnya :



Nitrat sebagai akseptor elektron:



Nitrifikasi dan denitrifikasi selengkapnya:



Konversi bahan organik menjadi nitrat sebagai hasil dari peningkatan ion hidrogen dan berpengaruh pada penurunan pH, yang berlanjut jika tidak cukup kapasitas buffer dari slugde yang diekspresikan dengan $CaCO_3$ (Metcalf & Eddy, 2003).

Biogas merupakan hasil akhir dari proses anaerobik dengan komponen utama CH_4 , CO_2 , H_2 , N_2 dan gas lain seperti H_2S . Biogas berasal dari proses biodegradasi material organik oleh bakteri dalam kondisi anaerob (tanpa udara). Kandungan utama dalam biogas adalah gas metan (CH_4) dan karbon dioksida (CO_2) (L. Naik, et al. 2014).

Gas metan dalam biogas, bila terbakar relatif lebih bersih dari pada batu bara dan menghasilkan energi yang lebih besar dengan emisi karbondioksida yang lebih sedikit (S. Krishnan, et al. 2016). Kandungan biogas selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 6.2.

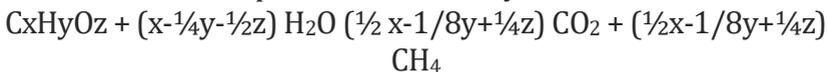
Tabel 6.2. Kandungan Umum Biogas

Kandungan Biogas	Komposisi (%)
Gas metan	54-70
Karbon dioksida	27-45
Nitrogen	3-5
Hidrogen	0-1
Karbon monoksida	0,1

Gas metan (CH_4) yang merupakan komponen utama biogas merupakan bahan bakar yang berguna karena mempunyai nilai kalor yang cukup tinggi. Nilai kalor yang cukup tinggi tersebut

menjadikan biogas dapat dipergunakan untuk keperluan penerangan, memasak, menggerakkan mesin dan sebagainya (P. Dobre, et al 2016). Untuk menghasilkan biogas, bahan organik ditampung dalam biodigester. Proses penguraian bahan organik terjadi secara anaerob (tanpa oksigen). Biogas terbentuk pada hari ke 4 - 5 sesudah biodigester terisi penuh dan mencapai puncak pada hari ke 20 - 25. Biogas yang dihasilkan sebagian besar terdiri dari 50 - 70% metan (CH₄), 30-40% karbon dioksida (CO₂) dan gas lainnya dalam jumlah kecil. Komposisi biogas sebagian besar hanya terdiri dari gas metan dan karbondioksida (S. K. Pramanik, et al. 2019).

Secara umum, reaksi pembentukan CH₄ yaitu :



Bahan baku yang lazim digunakan adalah kotoran ternak utamanya kotoran sapi atau kerbau yang banyak mengandung selulosa. Bahan baku dalam bentuk selulosa akan lebih mudah dicerna oleh bakteri anaerob. Reaksi pembentukan CH₄ adalah :



Biogas terbentuk dengan cara fermentasi dari pemecahan bahan organik oleh aktivitas mikroorganisme metanogenik dan mikroorganisme asidogenetik dengan kondisi anaerob. Mikroorganisme ini secara alami terdapat dalam limbah yang mengandung bahan organik (Kostecka, J. et al. 2015). Tahapan terbentuknya gas metan adalah hidrolisis, asidogenesis, asetogenesis, dan metanogenesis.

Hidrolisis :

Biogas terbentuk diawali dengan proses hidrolisis. Hidrolisis merupakan pemecahan senyawa kompleks menjadi senyawa sederhana. Senyawa kompleks berupa protein, karbohidrat dan lemak. yang diubah menjadi senyawa sederhana berupa asam amino, glukosa, dan asam lemak oleh bakteri dengan

bantuan eksoenzim karena senyawa-senyawa kompleks terlalu besar untuk dapat diserap secara langsung (P. Dobre, et al 2016).



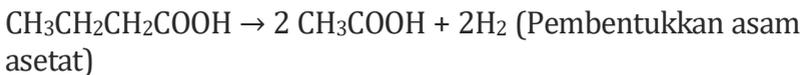
Asidogenesis :

Asidogenesis merupakan tahapan terusan dari hidrolisis, proses asidogenesis merupakan proses penguraian bahan kompleks organik menjadi monomer organik terlarut yang kemudian diurai menjadi asam-asam organik volatile seperti asam asetat (CH_3COOH), hidrogen (H_2), asam propionat, asam butirat, asam laktat, asam valerat, metanol dan karbon dioksida (CO_2) oleh bakteri anaerobik (R. Lora Grando, 2017).



Asetogenesis :

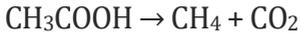
Asetogenesis merupakan proses pembentukan asam asetat dan hidrogen. Bakteri yang berperan dalam proses ini adalah bakteri asetogenik seperti *Acetobacterium woodii* dan *Syntrophobacter wolinii* (S. Krishnan, et al. 2016).



Metanogenesis :

Metanogenesis merupakan proses pembentukan gas metan oleh bakteri *Methanobacterium*, *Methanobacillus*, *Methanococcus*, dan *Methanosarcina*. Tahapan ini mendekarboksilasi asam asetat dan bersamaan dengan hidrogen (H_2), menghasilkan gas metan (CH_4) dan karbon dioksida (CO_2), dalam proses bakteri

metanogenik memerlukan waktu selama 14 hari dengan suhu rata-rata 25°C (A. Rabii, et al 2019).



Faktor-faktor dalam pembentukan gas metan perlu diperhatikan, agar pembentukan gas metan dalam biogas dapat optimal. Faktor-faktornya yang perlu diperhatikan antara lain mikroorganisme, lingkungan anaerob, senyawa inhibitor, derajat keasaman dan temperature. Produksi biogas sangat tergantung pada lingkungan dan kondisi anaerob ditempat mikroorganisme berkembang biak (S. K. Pramanik, et al. 2019).

Mikroorganisme memiliki peran penting dalam produktivitas gas metan, apabila kelangsungan hidup mikroorganisme metanogenik tidak terjaga maka produktivitas gas metan yang terbentuk akan rendah. Mikroorganisme pembentuk gas metan antara lain *Methanobacterium*, *Methanobacillus*, *Methanococcus*, dan *Methanosarcina* (S. Krishnan, et al. 2016). Pertumbuhan dan perkembangbiakan mikroorganisme maka nutrisi dalam substrat dan suasana pH yang stabil adalah hal yang dibutuhkan.

Digester harus tetap dijaga dalam keadaan anaerobik (tanpa kontak langsung dengan oksigen (O_2)). Bakteri metanogenik hanya dapat berkembang biak pada keadaan bebas oksigen (O_2). Proses digestasi anaerobik merupakan proses fermentasi bahan organik oleh aktivitas bakteri anaerob pada kondisi tanpa oksigen dan mengubahnya dari bentuk tersuspensi menjadi terlarut dan biogas. Oksigen (O_2) yang memasuki digester menyebabkan penurunan produksi metan, karena bakteri pembentuk gas metan tidak bekerja pada kondisi yang tidak sepenuhnya anaerob. Kondisi anaerob adalah kondisi dalam ruangan tertutup (kedap udara) dan tidak memerlukan oksigen (Kostecka, J. et al. 2015).

Tahapan metanogenesis sangat peka terhadap senyawa inhibitor, salah satunya adalah amonia. Amonia merupakan nutrisi yang dibutuhkan untuk pertumbuhan bakteri anaerob, namun pada konsentrasi yang tinggi akan menghambat proses metanogenesis (K. A. Koryś, *et al.* 2019). menyatakan bahwa amonia terbentuk dari degradasi senyawa-senyawa yang mengandung nitrogen terutama protein dan urea.

Untuk fase hidrolitik yang optimal dan fase produksi metana, pH ditetapkan masing-masing 5 dan 6,5-8, untuk asidogenesis adalah 4,0-8,5 dengan nilai optimal sekitar 6, dan untuk asetogenesis adalah sekitar 7. Kisaran pH optimal untuk metanogen adalah 5,5-8,5. Pertumbuhan metanogenik anjlok pada pH di bawah 6,6. pH harus dijaga sekitar netral karena metanogenesis adalah proses yang paling signifikan, dan proses lain dapat berfungsi di sekitar kondisi netral. pH dalam kisaran 6,6-8,0 adalah optimal [Kostecka, J *et al.* 2015]. Bakteri berkembang dengan baik pada keadaan yang agak asam (pH antara 6,6 - 8,0) (R. Lora Grando, *et al.* 2017). Oleh sebab itu kunci utama dalam kesuksesan kinerja digester dengan derajat keasaman agar tetap pada kisaran 6-8. Proses fermentasi oleh bakteri anaerob pada suasana pH 6-7. Nilai pH mengalami perubahan dengan perubahan temperatur di media reaksi. Seiring naiknya temperatur, kelarutan CO₂ akan berkurang. Ini dapat dinyatakan sebagai alasan untuk pH yang lebih tinggi pada digester termofilik, membandingkan digester mesofilik. Dalam digester mesofilik, asam karbonat terbentuk dengan peningkatan kelarutan CO₂, menyebabkan peningkatan keasaman (M. Noraini, *et al.* 2017). Sementara digestasi berlangsung, amonia yang dihasilkan dari pengisian fluks atau protein cenderung meningkatkan nilai pH. Namun, dengan pembentukan volatile fatty acid (VFA) dalam media reaksi, pH diturunkan. Media reaksi harus memiliki sistem penyangga yang memadai untuk menetralkan formasi VFA. Secara umum, pengelolaan pH dicapai dengan sistem buffer bikarbonat. Variasi

pH ditangani oleh sistem penyangga, sesuai dengan akumulasi basa/asam. Penggunaan kapasitas penyangga yang terlalu banyak akan menyebabkan variasi pH yang tinggi, mengakibatkan penghentian sebagian atau seluruh proses [A. E. Cioabla , et al 2012].

Temperatur adalah salah satu parameter penting yang sering terabaikan dari pandangan peneliti. Kegagalan untuk mengontrol temperatur reaksi dengan benar dapat menyebabkan penurunan efisiensi proses dan secara tidak langsung mempengaruhi laju reaksi, kelarutan logam berat dan karbon dioksida serta buffering. Secara teoritis, laju reaksi akan meningkat dengan meningkatnya temperatur sekitar. Dengan demikian, produksi biogas juga akan meningkat [L. Naik , et al 2014]. Ada tiga kisaran temperatur dalam digestasi anaerob yaitu: Psikofilik: $< 25^{\circ}\text{C}$, Mesofilik: $25- 40^{\circ}\text{C}$, dan Termofilik: $>45^{\circ}\text{C}$. Kebanyakan digester konvensional menggunakan temperatur mesofilik sekitar 35°C [R. Ganesh, et al 2017]. Dalam kisaran mesofilik, aktivitas dan tingkat pertumbuhan bakteri berkurang 50% untuk setiap penurunan 10°C . Turunnya produksi biogas dimulai, ketika temperatur menurun hingga 20°C dan produksi bahkan berhenti pada 10°C [M. Noraini, et.al 2017]. Namun, temperatur termofilik yaitu berkisar antara 55°C hingga 60°C patut dipertimbangkan karena akan menghasilkan lebih banyak biogas dalam waktu yang lebih singkat. Dalam hal laju reaksi, temperatur termofilik menawarkan laju reaksi yang lebih cepat dalam waktu yang lebih singkat dan karenanya, hasil gas yang lebih tinggi [L. Naik , et al 2014].

Waktu retensi hidraulik adalah waktu rata-rata agar senyawa yang dapat difermentasi tetap berada dalam digester dalam kontak dengan biomassa dan terurai menjadi produk metabolisme. Secara teoritis, waktu retensi yang lama akan menyebabkan efisiensi proses yang rendah. Dalam kondisi anaerob, dekomposisi zat organik lambat dan ini akan membutuhkan waktu lama untuk selesai. Jenis mikroba dan

kisaran temperaturnya adalah salah satu alasan yang akan mempengaruhi waktu retensi. Sistem temperatur termofilik dalam digestasi anaerob akan memiliki waktu retensi yang lebih pendek dibandingkan dengan sistem temperatur mesofilik(A. E. Cioabla, et al 2012). Pada temperatur tinggi, laju kinetika partikel meningkat begitu juga laju reaksi. Dengan demikian, proses konversi berlangsung lebih cepat dan mengurangi waktu retensi. Pada saat yang sama, waktu retensi yang lebih pendek menyebabkan koloni mikroba aktif untuk dicuci sementara waktu retensi yang lebih lama berarti volume digester yang lebih besar dan meningkatkan biaya operasional.

Selama digestasi anaerob, rasio C:N dalam bahan organik memainkan peran penting. Untuk mencapai stabilitas proses yang lebih baik selama proses digestasi, nilai rasio C:N melalui proses harus ditingkatkan [P. Dobre, et al. 2014]]. Untuk permulaan proses anaerob yang benar, beberapa penulis telah menetapkan nilai optimal sekitar 300:5:1 untuk C:N:P. Mengenai rasio C:N:P, keseimbangan optimal adalah antara 400:5:1 dan 100:28:6. Karena proporsi tidak ditemukan untuk pengolahan semua jenis limbah, salah satu alternatifnya adalah mencampurkan limbah yang berbeda untuk memastikan bahwa substrat yang diumpankan ke digester telah memiliki rasio yang memadai(I. A. Zakarya, et al. 2016). Meskipun pengaruh nutrisi pada populasi mikroba mungkin berbeda tergantung pada ketersediaannya sebagai fraksi yang larut (bioavailabilitas) atau padat, penting untuk mengkarakterisasi dengan benar perbedaan substrat pada saat itu mulai dari proses untuk memilih proporsi nutrisi yang paling cocok.

Pengadukan berfungsi untuk mendistribusikan secara merata bahan organik yang memasuki sistem dengan bakteri, distribusi ini memungkinkan terjadinya reaksi dengan lebih baik dengan menghasilkan produk sesuai dengan hasil proses yang diharapkan. Pengadukan memungkinkan gas untuk melewati busa atau di atas permukaan cairan, mencegah bahan bahan dalam

cairan agar tidak jatuh ke bawah dan memungkinkan kontak antara bakteri dan bahan organik berlangsung homogen. Homogenisasi larutan dapat meningkatkan produksi gas hingga 10-15% (A. Gil, *et al.* 2018). Keuntungan lainnya adalah menyeragamkan perubahan temperatur limbah dalam fermentor, mengatur kepadatan populasi bakteri dalam bubur dan mempercepat reaksi dengan menyediakan campuran populasi bakteri dan limbah segar.

DAFTAR PUSTAKA

- A. E. Cioabla, I. Ionel, G. A. Dumitrel, and F. Popescu, "Comparative study on factors affecting anaerobic digestion of agricultural vegetal residues," *Biotechnol. Biofuels*, vol. 5, no. 39, pp. 1–9, 2012.
- A. Gil, J. A. Siles, A. Serrano, A. F. Chica, and M. A. Martín, "Effect of variation in the C/[N+P] ratio on anaerobic digestion," *Environ. Prog. Sustain. Energy*, pp. 1–9, 2018.
- A. Rabii, S. Aldin, Y. Dahman, and E. Elbeshbishy, "A review on anaerobic codigestion with a focus on the microbial populations and the effect of multi-stage digester configuration," *Energies*, vol. 12, pp. 1–25, 2019.
- I. A. Zakarya, S. N. B. Khalib, K. N. F. Mat, and T. N. T. Izhar, "Effect of pH, alkalinity and C: N ratio during anaerobic digestion of palm oil mill effluent in two-phase reactor with food waste as a feedstock," *J. Multidiscip. Eng. Sci. Technol.*, vol. 3, pp. 6127–6131, 2016. [21]
- K. A. Koryś, A. E. Latawiec, K. Grotkiewicz, and M. Kuboń, "The review of biomass potential for agricultural biogas production in Poland," *Sustainability*, vol. 11, pp. 1–13, 2019.
- Kostecka, J. Koc-jurczyk, and K. Brudzisz, "Waste management in Poland and European Union," *Arch. Waste Manag. Environ. Prot.*, vol. 16, no. 1, pp. 1–10, 2014.[3] J. R. Jambeck et al., "Plastic waste inputs from land into the ocean," *Science*, vol. 347, no. 6223, pp. 768–771, 2015.P. Dobre, F. Nicolae, and F. Matei, "Main factors affecting biogas production - an overview," *Rom. Biotechnol. Lett.*, vol. 19, no. 3, pp. 9283–9296, 2014.

- L. Naik, Z. Gebreegziabher, V. Tumwesige, B. B. Balana, J. Mwirigi, and G. Austin, "Factors determining the stability and productivity of small scale anaerobic digesters," *Biomass and Bioenergy*, pp. 1–7, 2014.
- M. Noraini, S. N. A. Sanusi, O. S. J. Elham, M. Z. Sukor, and K. H. K. Hamid, "Factors affecting production of biogas from organic solid waste via anaerobic digestion process : a review," *Solid State Sci. Technol.*, vol. 25, no. 1, pp. 29–39, 2017. Metcalf & Eddy, 2003. *Wastewater Engineering, Treatment and Reuse*. Fourth Edition. McGraw-Hill, New York.
- R. Ganesh, M. Torrijos, P. Sousbie, A. Lugardon, J. P. Steyer, and J. P. Delgenes, "Single-phase and two-phase anaerobic digestion of fruit and vegetable waste: Comparison of start-up, reactor stability and process performance," *Waste Manag.*, vol. 34, pp. 875–885, 2014.
- R. Kothari, A. K. Pandey, S. Kumar, V. V. Tyagi, and S. K. Tyagi, "Different aspects of dry anaerobic digestion for bio-energy: An overview," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 39, pp. 174–195, 2014.
- R. Lora Grando, A. M. de Souza Antune, F. V da Fonseca, A. Sánchez, R. Barrena, and X. Font, "Technology overview of biogas production in anaerobic digestion plants: A European evaluation of research and development," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 80, pp. 44–53, 2017.
- S. K. Pramanik, F. B. Suja, M. Porhemmat, and B. K. Pramanik, "Performance and kinetic model of a single-stage anaerobic digestion system operated at different successive operating stages for the treatment of food waste," *Processes*, vol. 7, no. 600, pp. 1–16, 2019.

- S. Krishnan, L. Singh, M. Sakinah, S. Thakur, Z. A. Wahid, and M. Alkasrawi, "Process enhancement of hydrogen and methane production from palm oil mill effluent using two-stage thermophilic and mesophilic fermentation," *Int. J. Hydrogen Energy*, pp. 1- 11, 2016.

BAB 7

METODE PENGOLAHAN LIMBAH B3

Oleh Isran Asnawi

7.1 Latar Belakang dan Prinsip Pengolahan

Limbah B3 merupakan salah satu jenis limbah yang turut berkontribusi pada pencemaran lingkungan. Berdasarkan Peraturan Pemerintah Nomor 101 Tahun 2014 tentang Pengelolaan Limbah B3, limbah B3 adalah sisa suatu usaha dan/atau kegiatan yang mengandung bahan berbahaya dan beracun (Pemerintah Republik Indonesia, 2014). Berdasarkan data statistik dari Kementerian Lingkungan Hidup, pada tahun 2021, Indonesia telah menghasilkan timbulan limbah B3 sebanyak 60 juta ton (KLHK, 2021). Hal ini memicu perlunya melakukan pengelolaan terhadap limbah B3.

Kegiatan pengelolaan limbah B3 meliputi pengurangan, penyimpanan, pengangkutan, pemanfaatan, pengolahan, dan penimbunan. Hal ini tercantum pada Peraturan Pemerintah Nomor 101 Tahun 2014 tentang Pengelolaan Limbah B3. Seluruh kegiatan pengelolaan ini dipantau dan dimonitor oleh kementerian lingkungan hidup. Salah satu bagian penting dari pengelolaan limbah B3 adalah pengolahan. Seluruh badan atau usaha yang menghasilkan limbah B3 wajib melakukan pengelolaan limbah B3 termasuk pengolahan. Pengetahuan terkait metode pengolahan limbah B3 menjadi suatu hal yang penting dikuasai oleh penghasil limbah B3.

Pengolahan limbah B3 telah diatur dalam Keputusan Badan Pengendalian Dampak Lingkungan No. 3 Tahun 1995 tentang Persyaratan Teknis Pengolahan Limbah B3. Berdasarkan peraturan tersebut pengolahan limbah B3 dibagi menjadi 3 yaitu

(1) pengolahan secara fisika dan kimia; (2) stabilisasi solidifikasi; dan (3) termal (Lingkungan, 1995).

Pada bagian ini dibahas upaya pengolahan limbah B3 dengan klasifikasi berdasarkan tujuan pengolahannya yaitu sebagai berikut:

1. Solidifikasi, yaitu pengubahan sifat fisik limbah B3 menjadi wujud yang lebih padat. Upaya pemadatan ini meliputi pemadatan menggunakan pozzolan dan semen portland, enkapsulasi, serta upaya vitrifikasi.
2. Stabilisasi, yaitu pengurangan atau penghilangan tingkat bahaya dari limbah B3. Upaya pengurangan atau penghilangan tingkat bahaya ini dapat dilakukan secara fisika, kimia, dan biologi.
3. Termal, yaitu pemusnahan atau penghancuran limbah B3 dengan menggunakan suhu tinggi. Upaya pemusnahan ini dilakukan dengan cara insinerasi, pirolisis, dan gasifikasi.

7.2 Solidifikasi

Solidifikasi adalah proses pengubahan sifat fisik limbah B3 menjadi wujud yang lebih padat dan stabil dengan menambahkan bahan pengikat atau agen pengikat tertentu. Bahan pengikat ini bertindak sebagai agen perekat yang mengikat partikel-partikel limbah B3 sehingga membentuk blok padat atau bahan yang lebih mudah ditangani dan diatur. Dengan upaya pemadatan limbah B3 ini, maka dapat mengurangi pergerakan dan penyebaran zat berbahaya dalam limbah B3. Selain itu, upaya pemadatan dapat meningkatkan kestabilan fisik dan kimia limbah B3. Beberapa teknik pemadatan yang sering digunakan antara lain pemadatan dengan bahan pengikat pozzolan dan semen portland, enkapsulasi, dan vitrifikasi (Barth, 1990).

7.2.1 Pemadatan menggunakan pozzolan dan semen portland

Pozzolan merupakan material yang mengandung silika dan alumina. Pozzolan apabila berikatan air, maka akan membentuk

kalsium hidroksida (Ca(OH)_2). Kalsium hidroksida ini merupakan wujud padat dengan sifat fisik yang lebih keras. Pozzolan terbagi atas beberapa kelas, yaitu:

1. Kelas N, yaitu pozzolan alami yang diperoleh dari hasil pembakaran, contohnya tanah diatomik, opalin, dan abu vulkanik.
2. Kelas C, yaitu abu terbang hasil pembakaran batubara yang mengandung kalsium oksida lebih dari 10%
3. Kelas F yaitu abu terbang hasil pembakaran batubara dengan kandungan kalsium oksida kurang dari 10%

Berdasarkan sumbernya, pozzolan dibagi menjadi pozzolan alami dan pozzolan buatan. Pozzolan alami berasal dari sedimentasi dari abu lava gunung berapi yang mengandung silika aktif. Salah satu jenis pozzolan alam yang sering digunakan adalah bentonit. Pozzolan buatan berasal dari sisa hasil pembakaran tungku dengan bahan bakar berupa batubara yang sering disebut sebagai abu terbang (*fly ash*) dan abu dasar (*bottom ash*) (Nindyapuspa, 2017).

Pemadatan dengan pozzolan biasanya digunakan untuk proses remediasi tanah yang tercemar limbah B3, dimana limbah B3 ini mengandung sulfat dan halida. Pemadatan dengan pozzolan juga efektif digunakan untuk proses remediasi tanah tercemar limbah B3 yang memiliki pH rendah. Hal ini dikarenakan dengan penambahan pozzolan dapat menetralkan keasaman pada tanah (Anrozi and Trihadiningrum, 2017).

Semen Portland adalah semen yang dihasilkan dari penggilingan terak semen Portland yang terdiri dari kalsium silikat yang bersifat hidrolis dan digiling bersama dengan bahan aditif. Bahan aditif tersebut dapat berupa senyawaan kristal kalsium sulfat. Kandungan terbesar dalam semen adalah kandungan CaO dan SiO_2 , dan Al_2O_3 . CaO memiliki fungsi dalam proses perekatan

atau pengikatan. SiO_2 berfungsi sebagai bahan pengisi (filler). Al_2O_3 memiliki fungsi dalam mempercepat proses pengerasan.

Semen portland cocok untuk digunakan sebagai bahan pengikat solidifikasi pada remediasi tanah tercemar limbah B3 anorganik seperti logam berat namun tidak cocok tanah tercemar limbah B3 yang mengandung sulfat. Hal ini dikarenakan silika alumina dan sulfat yang berikatan dapat menyebabkan keretakan secara fisik.

Menurut kajian oleh (Trihadiningrum, 2000), beberapa keuntungan dari penggunaan semen sebagai upaya solidifikasi antara lain:

1. Komposisi kimia semen portland yang konsisten dan tidak membutuhkan proses pengeringan yang ekstensif
2. Teknik pemrosesan yang mudah dan menunjukkan hasil yang baik dalam proses setting, pengerasan, dan fiksasi logam
3. Sifat basa dari semen dapat menetralkan limbah asam dan membentuk garam karbonat dan hidroksida dari logam berat
4. Ekonomis

Sedangkan kerugian dari penggunaan semen sebagai upaya solidifikasi antara lain:

1. Membutuhkan bahan dalam jumlah besar.
2. Semen merupakan produk industri yang energi-intensif.
3. Proses solidifikasi terganggu oleh adanya limbah organik.
4. Volume dan berat limbah menjadi besar sehingga butuh ruang untuk penyimpanan
5. Hasil pemadatan berpotensi mengalami pelindian dalam suasana asam.

7.2.2 Enkapsulasi

Enkapsulasi pada pengolahan limbah B3 adalah metode yang melibatkan pengemasan atau pembungkusan limbah B3 dalam matriks padat atau bahan pengikat untuk mengurangi bahaya limbah dan mencegah kontak langsung dengan lingkungan. Tujuan utama enkapsulasi adalah mengurangi mobilitas zat berbahaya dalam limbah dan mencegah pelepasan atau penyebaran yang tidak terkendali ke lingkungan sekitarnya. Proses enkapsulasi melibatkan penggunaan bahan pengikat, seperti resin, polimer, semen, atau bahan perekat lainnya, yang membungkus dan mengikat limbah B3 dalam matriks padat. Limbah B3 yang dienkapsulasi ini kemudian membentuk benda padat atau blok yang lebih stabil dan mudah ditangani. Proses ini melibatkan pencampuran limbah dengan bahan pengikat dalam rasio yang sesuai, dan kemudian dicetak atau diproses menjadi bentuk yang diinginkan. Beberapa jenis enkapsulasi antara lain enkapsulasi makro, enkapsulasi mikro, dan enkapsulasi termoplastik.

1. Enkapsulasi makro

Enkapsulasi makro adalah pengemasan limbah B3 dalam kapsul yang non-reaktif dan kedap air. Bahan kapsul dapat berupa campuran *fiberglass*, resin epoksida, dan resin poliuretan. Limbah B3 tertahan dalam matriks yang terbentuk dari material kapsul. Enkapsulasi makro melibatkan penggunaan matriks padat yang memiliki ukuran partikel yang lebih besar untuk mengikat limbah B3. Partikel limbah yang dienkapsulasi dalam enkapsulasi makro biasanya memiliki ukuran yang lebih besar, biasanya dalam rentang milimeter hingga sentimeter.

Proses enkapsulasi makro melibatkan pencampuran limbah B3 dengan bahan pengikat yang cocok, seperti semen atau polimer, dalam rasio tertentu. Campuran kemudian dicetak atau diproses menjadi bentuk padat yang lebih besar,

seperti balok, blok, atau pavers. Limbah B3 diikat dalam matriks padat ini, membentuk struktur yang kokoh dan mudah ditangani.

Enkapsulasi makro biasanya digunakan untuk limbah B3 yang memiliki karakteristik fisik yang cukup heterogen atau partikel limbah yang lebih besar. Teknik ini memungkinkan pengolahan limbah dalam skala yang lebih besar dan cocok untuk pengolahan limbah B3 berat.

2. Enkapsulasi mikro

Enkapsulasi mikro, di sisi lain, melibatkan penggunaan matriks padat dengan ukuran partikel yang lebih kecil untuk mengikat limbah B3. Partikel limbah yang dienkapsulasi dalam enkapsulasi mikro memiliki ukuran yang lebih kecil, biasanya dalam rentang mikrometer hingga milimeter.

Enkapsulasi mikro melibatkan pengadukan antara limbah dan bahan kapsul sebelum pemadatan terjadi. Limbah B3 yang akan dibungkus dari matriks tersolidifikasi pada level mikroskopis dari struktur kristalin. Sebagian besar limbah B3 yang dipadatkan tetap terperangkap meskipun bahan yang terstabilisasi terdegradasi menjadi partikel berukuran kecil.

Enkapsulasi mikro biasanya digunakan untuk tanah tercemar senyawa hidrokarbon. Selain itu, enkapsulasi mikro juga diterapkan pada tanah berpasir, namun tidak cocok diterapkan pada tanah liat. Hal ini dikarenakan kandungan silika pada tanah berpasir cukup besar. Silika berperan dalam peningkatan kekuatan produk dan penyisihan kontaminan pada enkapsulasi mikro. Efisiensi enkapsulasi mikro pada tanah tercemar hidrokarbon dalam dapat mencapai hingga 85%.

3. Enkapsulasi termoplastik

Enkapsulasi ini menggunakan polimer termoplastik. Pada prosesnya, limbah yang telah diayak dengan ukuran partikel sebesar 0,3 – 0,07 mm, dicampurkan dengan polimer

plastik. Hasil campuran diletakkan pada wadah tertutup dan diaduk dengan *screw extruder* hingga didapatkan matriks limbah yang homogen. Jenis limbah B3 yang sesuai untuk diolah dengan metode enkapsulasi termoplastik adalah limbah yang mengandung senyawa halida dan senyawa organik padat seperti resin, plastik, dan tar.

Tahapan awal pada enkapsulasi termoplastik adalah pencampuran. Limbah B3 dan bahan termoplastik yang sesuai dicampurkan secara menyeluruh dalam rasio yang tepat. Campuran ini biasanya melibatkan pemanasan limbah dan bahan termoplastik agar bisa dicampur dengan baik. Campuran limbah B3 dan bahan termoplastik yang sudah dicampur kemudian dipanaskan hingga mencapai suhu pelelehan bahan termoplastik. Saat dalam kondisi leleh, campuran ini dapat dicetak dalam bentuk yang diinginkan, seperti balok, panel, atau bentuk lainnya. Setelah pencetakan, campuran limbah B3 dan bahan termoplastik didinginkan sehingga membentuk matriks padat. Selama proses pendinginan, bahan termoplastik mengeras dan mengikat limbah B3, serta mengenkapsulasi limbah dalam struktur padat.

4. Keuntungan solidifikasi dengan enkapsulasi

Keuntungan utama enkapsulasi adalah pengurangan mobilitas limbah B3. Enkapsulasi dapat mengurangi mobilitas zat berbahaya dalam limbah B3 dengan mengikatnya pada matriks padat. Hal ini dapat mencegah pelepasan dan penyebaran zat berbahaya ke lingkungan, serta mengurangi risiko kontaminasi. Dengan demikian, enkapsulasi melindungi lingkungan dari paparan langsung terhadap limbah B3 yang berbahaya. Dengan membungkus limbah dalam matriks padat, enkapsulasi mencegah kontak dengan air tanah, udara, atau organisme hidup, mengurangi risiko pencemaran.

Penting untuk dicatat bahwa enkapsulasi bukanlah solusi akhir untuk pengolahan limbah B3. Limbah yang dienkapsulasi mungkin masih perlu dikelola lebih lanjut, seperti penyimpanan jangka panjang, pengolahan lebih lanjut, atau pembuangan yang aman sesuai dengan peraturan lingkungan yang berlaku.

7.2.3 Vitrifikasi

Vitrifikasi adalah pengolahan termal yang mengubah limbah menjadi gelas atau bahan kristalin. Proses vitrifikasi beroperasi pada suhu 1200 °C dengan menggunakan teknologi peleburan untuk mengubahnya menjadi bentuk kaca padat yang stabil. Pada suhu ini, semua bahan organik dan beberapa bahan anorganik (seperti sianida, nitrat) telah hancur. Senyawa organik akan membentuk gas (seperti karbon dioksida, uap air, nitrogen oksida, sulfur) saat berinteraksi dengan senyawa organik lain dalam lelehan, atau dengan oksigen saat keluar dari proses. Hasil dari vitrifikasi adalah limbah B3 dengan wujud keras, amorf, dan *kaca-like* yang disebut *vitrified waste* atau limbah terkaca.

Penting untuk diketahui bahwa vitrifikasi merupakan proses yang kompleks dan membutuhkan biaya yang cukup besar. Metode ini umumnya digunakan untuk limbah B3 yang sangat berbahaya atau limbah nuklir, di mana metode pengolahan lain mungkin tidak cukup efektif untuk mengatasi bahaya limbah tersebut. Selain itu, pemantauan dan pengendalian yang ketat diperlukan selama dan setelah proses vitrifikasi untuk memastikan keamanan dan kesesuaian limbah terkaca.

7.3 Stabilisasi

Stabilisasi adalah proses kimia atau fisika yang bertujuan untuk mengubah sifat kimia atau fisik limbah B3 agar menjadi kurang berbahaya atau tidak berbahaya sama sekali. Tujuan utama stabilisasi adalah mengurangi kelarutan, toksisitas, mobilitas, atau

reaktivitas bahan berbahaya dalam limbah B3. Hal ini dapat dicapai dengan menggunakan metode seperti penyesuaian pH, pengoksidasi atau pengurangan, pengendapan, atau pengikatan senyawa berbahaya dalam struktur molekul yang lebih stabil.

Secara umum, stabilisasi limbah B3 dapat dilakukan menggunakan metode pengolahan sebagai berikut:

1. Pengolahan secara fisika, yaitu pengolahan limbah B3 yang melibatkan kontak fisik antar partikel pencemaran tanpa mengubah struktur senyawa kimia.
2. Pengolahan secara kimia, yaitu pengolahan limbah B3 dengan menggunakan bahan kimia untuk mengurangi atau menghilangkan tingkat bahaya dari limbah tersebut.
3. Pengolahan secara biologi, yaitu pengolahan limbah B3 yang melibatkan mikroba.

7.3.1 Pengolahan secara fisika

Pengolahan limbah B3 secara fisika pada umumnya berlangsung dengan prinsip pemisahan dan pemurnian limbah B3 menggunakan prinsip-prinsip fisika. Metode ini bertujuan untuk memisahkan limbah B3 dari komponen non-berbahaya dan mengurangi konsentrasi atau volume limbah tersebut. Beberapa metode pengolahan limbah B3 secara fisika yang umum digunakan meliputi:

1. Filtrasi, adalah proses pemisahan berdasarkan ukuran partikel yang dilakukan dengan cara melewatkan limbah B3 menggunakan saringan tertentu. Saringan ini memiliki ukuran pori tertentu yang memungkinkan hanya partikel yang lebih kecil yang dapat melewati pori dan partikel besar tertahan pada saringan. Hasil dari proses ini diperoleh limbah dengan konsentrasi kelarutan yang lebih rendah sebelum pengolahan.
2. Sedimentasi, dilakukan dengan cara mendiamkan limbah B3 cair pada beberapa waktu hingga partikel padat yang

menjadi pencemar turun ke bawah. Metode ini didasarkan pada pemisahan zat atau partikel dengan massa jenis yang lebih besar akan turun ke bawah secara gravitasi. dikhususkan untuk limbah B3 cair yang banyak mengandung pengotor berupa zat padat.

3. Pemisahan magnetik, metode ini digunakan untuk memisahkan limbah B3 yang mengandung material yang responsif terhadap medan magnetik. Dalam proses ini, limbah B3 ditempatkan di dalam medan magnet, dan material magnetik akan tertarik atau terpisah berdasarkan sifat magnetiknya, sehingga memungkinkan pemisahan dari komponen non-magnetik. Pada umumnya metode ini digunakan untuk limbah yang berwujud padat atau cairan yang mengandung padatan dengan komposisi material yang responsif terhadap medan magnetik.
4. Flotasi, adalah metode pemisahan berdasarkan berat jenis zat terkecil yang ditiupkan gelembung udara agar zat tersebut mengapung ke bagian atas cairan. Zat dengan berat jenis terendah ini merupakan zat yang ingin dihilangkan atau dipisahkan. Metode ini sering digunakan dalam pengolahan limbah B3 untuk memisahkan partikel-padatan, minyak, logam berat, surfaktan, atau senyawa organik yang berbahaya.

7.3.2 Pengolahan secara kimia

Prinsip pengolahan limbah B3 secara kimia adalah penambahan bahan kimia untuk penetralan nilai pH dan pengurangan jumlah ion terlarut. Hal ini dilakukan dengan cara menambahkan bahan kimia yang reaktif terhadap senyawa pencemar limbah B3 sehingga tingkat bahaya dapat dikurangi atau dihilangkan. Beberapa metode pengolahan secara kimia antara lain:

1. Netralisasi, adalah upaya penetralan limbah B3 cair yang memiliki derajat keasaman atau kebasaaan yang cukup ekstrim. Upaya ini dilakukan dengan penambahan asam atau basa hingga diperoleh pH netral (biasanya 6-9). Bahan kimia yang sering ditambahkan untuk limbah bersifat asam ($\text{pH} < 6$) adalah basa yang dapat berupa soda kaustik (NaOH), larutan kapur, atau sodium karbonat. Bahan kimia yang sering ditambahkan untuk limbah bersifat basa ($\text{pH} > 9$) adalah asam yang dapat berupa asam asetat atau asam sulfat.
2. Presipitasi, adalah pengurangan kelarutan limbah B3 dengan cara menambahkan bahan kimia agar terjadi pengendapan. Pada umumnya metode ini ditujukan untuk limbah B3 cair yang mengandung logam berat yang cukup tinggi. Bahan kimia yang umum digunakan untuk presipitasi adalah NaOH . Hal ini bertujuan agar logam berat terikat dengan gugus hidroksil dan membentuk endapan hidroksida.
3. Pertukaran ion, dilakukan dengan cara melewati limbah B3 cair pada resin yang dapat berupa kation atau anion sehingga terjadi pertukaran ion dari limbah dengan resin. Hal ini bertujuan untuk mengurangi kelarutan ion-ion tertentu dalam limbah cair.
4. Koagulasi flokulasi, adalah penambahan bahan kimia ke limbah B3 cair sehingga terjadi proses penggumpalan secara fisika yang menyebabkan stabilisasi koloid dan pengendapan. Hasil dari proses cairan bagian atas yang lebih jernih. Bahan kimia yang digunakan pada pengolahan ini disebut sebagai koagulan. Koagulan yang sering digunakan untuk proses koagulasi flokulasi antara lain tawas atau alum, poli-aluminium klorida (PAC), FeCl_3 , dan $\text{Fe}(\text{SO}_4)_2$. Pengolahan ini cocok digunakan untuk limbah B3

cair mengandung partikel tersuspensi, logam berat, dan nilai BOD/COD yang tinggi.

7.3.3 Pengolahan secara biologi

Pengolahan limbah secara biologi dikhususkan untuk mengurangi atau menghilangkan senyawa-senyawa organik yang tidak diinginkan pada limbah B3. Prinsip pengolahan ini adalah dengan penguraian senyawa organik dengan bantuan mikroba. Karakteristik senyawa organik sebagai zat yang tidak diinginkan pada limbah B3, akan diurai oleh mikroba sebagai nutrisi untuk keberlangsungan hidup mikroba. Secara umum, metode pengolahan biologi dibagi menjadi 3 bagian yaitu aerob, anaerob, anoksik. Hal tersebut didasarkan ketersediaan jumlah oksigen sebagai penyokong berlangsungnya proses penguraian.

Pengolahan limbah B3 secara aerob melibatkan penggunaan oksigen dalam proses penguraian senyawa organik yang terkandung dalam air limbah. Proses ini memerlukan keberadaan oksigen terlarut di dalam air atau udara yang ditiupkan ke dalam reaktor pengolahan air limbah. Terdapat berbagai jenis tipe pengolahan aerob yang dapat digunakan untuk pengolahan limbah B3, antara lain lumpur aktif, kolam aerasi, membran bioreaktor, *moving bed biofilm reactor* (MBBR), *packed bed reactor*, reaktor biologis putar, dan filter resapan (*trickling filter*).

Pengolahan limbah B3 secara anaerob terjadi dalam kondisi tanpa oksigen atau dengan konsentrasi oksigen yang sangat rendah. Proses ini melibatkan mikroba anaerob, terutama bakteri, yang dapat mengurai senyawa organik dalam air limbah tanpa oksigen. Bakteri anaerob menghasilkan gas metana dan lumpur aktif sebagai produk sampingan dari penguraian senyawa organik. Terdapat berbagai jenis tipe pengolahan anaerob yang dapat digunakan untuk pengolahan limbah B3, antara lain *anaerobic packed and fluidized bed*, *upflow anaerobic sludge blanket* (UASB), anaerobik digester dan proses anammox.

Pengolahan limbah B3 secara anoksik terjadi dalam kondisi tanpa oksigen bebas, tetapi dengan adanya gugus fungsi oksigen dari senyawa lain seperti nitrat atau sulfat. Proses anoksik melibatkan mikroorganisme yang menggunakan senyawa pengganti oksigen sebagai akseptor elektron dalam proses metabolisme. Metode pengolahan limbah anoksik sering digunakan untuk limbah B3 yang mengandung senyawa nitrogen, seperti nitrat atau nitrit. Beberapa reaktor anoksik, seperti reaktor denitrifikasi, digunakan untuk mengkonversi nitrat menjadi nitrogen gas, yang dapat dilepaskan ke atmosfer.

7.3.4 Teknologi terkini pengolahan limbah B3

Berbagai riset telah dilakukan sebagai upaya pengembangan teknologi stabilisasi limbah B3. Kajian oleh (Wang *et al.*, 2019) telah mempublikasikan kumpulan riset terkait teknologi terkini pengolahan limbah B3 dari air, tanah, sedimen, dan udara yang terkontaminasi. Klasifikasi pengolahan limbah B3 tersebut dibagi menjadi metode fisika, metode kimia, dan metode biologi dengan rincian sebagai berikut:

1. Fisika → adsorpsi, koagulasi dan elektrokoagulasi, filtrasi pasir, elektrosorpsi, elektrodialisis, elektrokinetika, teknologi membran, fotokatalisis, fotoelektrokimia oksidasi, sonokimia, plasma non-termal, aliran superkritis, elektro-oksidasi, elektro-reduksi.
2. Kimia → teknologi berbasis ozon, penambahan bahan kimia berupa hidrogen peroksida, kalium permanganat, proses fenton, persulfat.
3. Biologi → metode aerob, metode anaerob, bioreaktor, kolam aerasi, bioremediasi tanah, biofilter.

Berikut penjelasan beberapa teknologi pengolahan yang telah dijelaskan diatas:

1. Adsorpsi, adalah suatu fenomena ketika suatu zat mengalami penjerapan pada permukaan zat tertentu sehingga membentuk suatu lapisan. Metode ini fokus pada pengurangan kadar logam berat limbah B3.
2. Elektrokoagulasi, adalah metode koagulasi dengan bantuan arus listrik. Metode ini fokus untuk limbah yang mengandung partikel suspensi dan nilai COD yang cukup tinggi. Beberapa hasil penelitian melaporkan bahwa metode ini mampu mengurangi kekeruhan hingga 99%.
3. Elektrosorpsi, adalah metode adsorpsi dengan bantuan arus listrik. Metode ini memiliki efisiensi pengurangan nilai COD dan TOQ sebesar 21-35%
4. Elektrodialisis, adalah proses pemisahan ion menggunakan membran yang bersifat selektif dengan bantuan arus listrik. Metode ini efektif mengurangi amonia dan fosfat pada limbah B3 sebesar 75-78%.
5. Fotokatalisis, adalah katalis yang digunakan untuk mempercepat reaksi kimia dengan bantuan sinar atau cahaya. Proses fotokatalis diaplikasikan untuk pengolahan limbah cair yang mengandung senyawa organik, contohnya fenol. Salah contoh fotokatalis yang sering digunakan untuk pengolahan limbah adalah titanium oksida.
6. Sonokimia, yaitu degradasi senyawa organik atau anorganik dengan bantuan gelombang ultrasonik. Metode ini efektif untuk pengurangan nilai COD dan BOD pada limbah B3 selain pengolahan secara biologi. Beberapa hasil penelitian melaporkan bahwa metode ini efektif mengurangi nilai COD 65-84%.
7. Teknologi ozon, metode ini secara umum digunakan untuk desinfeksi. Saat ozon membunuh bakteri, maka bakteri tidak akan menggunakan oksigen terlarut untuk mengurai

senyawa organik dalam limbah B3 tersebut sehingga nilai BOD dan COD berkurang.

8. Bioremediasi tanah, penyerapan dan degradasi logam berat atau senyawa anorganik pada tanah menggunakan bantuan mikroorganisme.
9. Biofilter, adalah pengolahan limbah B3 secara biologi dengan cara melewatkan limbah pada biofilter sebagai tempat melekat mikroba untuk mendegradasi senyawa organik pada limbah B3.

Perlu diketahui bahwa masing-masing teknologi pengolahan limbah B3 tersebut memiliki kelebihan dan kekurangan. Karakteristik limbah menjadi aspek penting dalam pemilihan teknologi atau metode pengolahan.

7.4 Termal

Pengolahan limbah B3 secara termal merupakan metode yang melibatkan penggunaan suhu tinggi untuk pengolahan limbah B3. Tujuan utama metode termal ini adalah menghilangkan, menghancurkan atau mengubah limbah B3 menjadi bentuk yang kurang berbahaya atau aman. Melalui proses pemanasan pada suhu tinggi (pembakaran) maka kuantitas limbah B3 secara fisik berkurang, baik volume dan massa.

Pada umumnya metode termal diaplikasikan untuk limbah B3 yang berwujud padat dan mengandung senyawa anorganik yang tidak dapat terurai pada suhu rendah. Beberapa metode pembakaran yang digunakan untuk pengolahan limbah B3 secara termal antara lain insinerasi, pirolisis, dan gasifikasi. Berikut penjelasannya:

1. Insinerasi, adalah metode pembakaran dengan melibatkan penggunaan suhu tinggi dalam sebuah tungku atau pembakaran limbah B3. Limbah B3 ditempatkan di dalam tungku dan diberikan pasokan udara atau oksigen yang

cukup untuk menghasilkan reaksi pembakaran. Proses ini mengubah limbah B3 padat menjadi abu, gas, dan panas. Gas yang dihasilkan dapat diolah lebih lanjut atau dikendalikan untuk mengurangi emisi polutan.

2. Pirolisis, adalah proses termal yang melibatkan pemrosesan limbah B3 pada suhu tinggi dalam kondisi tanpa oksigen atau dengan jumlah oksigen yang terbatas. Dalam proses pirolisis, limbah B3 terurai menjadi fraksi padat (misalnya, arang aktif atau bahan bakar padat), gas, dan cairan. Fraksi padat dapat digunakan kembali atau dibuang dengan aman, sementara gas dan cairan dapat diolah lebih lanjut atau dimanfaatkan energinya.
3. Gasifikasi, adalah proses termal yang melibatkan konversi limbah B3 menjadi gas sintetik (gasifikasi gas) atau gas bahan bakar (gasifikasi bahan bakar) melalui reaksi termal dengan jumlah oksigen yang terbatas. Proses ini menghasilkan gas seperti karbon monoksida (CO) dan hidrogen (H₂) yang dapat digunakan sebagai sumber energi atau bahan baku industri.

Pengolahan limbah B3 secara termal memiliki beberapa keuntungan, termasuk pengurangan volume limbah, penghancuran zat berbahaya, dan potensial untuk memanfaatkan energi yang dihasilkan. Perlu diketahui bahwa pengolahan limbah B3 secara termal dilakukan dengan memperhatikan regulasi yang berlaku. Hal ini dikarenakan proses termal yang tidak tepat atau tidak terkontrol dapat menghasilkan polutan udara dan residu berbahaya. Berdasarkan Keputusan Badan Pengendalian Dampak Lingkungan No. 3 Tahun 1995 tentang Persyaratan Teknis Pengolahan Limbah B3, efisiensi pembakaran insinerasi limbah B3 adalah > 99,99%. Selain itu pada baku mutu tersebut juga diatur mengenai baku mutu emisi udara yang dihasilkan dari pembakaran

insinerasi antara lain SO_2 , NO_2 , HF, CO, HCl, total hidrokarbon sebagai CH_4 , As, Cd, Cr, Pb, Hg, Ta, dan opasitas.

DAFTAR PUSTAKA

- Anrozi, R. and Trihadiningrum, Y. 2017. 'Kajian Teknologi dan Mekanisme Stabilisasi/Solidifikasi untuk Pengolahan Limbah B3', *Jurnal Teknik ITS*, 6(2), pp. 456–461.
- Barth, E. F. 1990. 'An overview of the history, present status, and future direction of solidification/stabilization technologies for hazardous waste treatment', *Journal of Hazardous Materials*, 24(2–3), pp. 103–109. doi: 10.1016/0304-3894(90)87002-Y.
- KLHK, K. B. H. M. 2021. *Refleksi KLHK 2021: Capaian Pengelolaan Sampah, Limbah Dan B3*. Available at: <https://ppid.menlhk.go.id/berita/siaran-pers/6344/refleksi-klhk-2021-capaian-pengelolaan-sampah-limbah-dan-b3> (Accessed: 4 July 2023).
- Lingkungan, B. P. D. 1995. *Keputusan Nomor 3 Tahun 1995 tentang Persyaratan Teknis Pengolahan Limbah B3*. Jakarta.
- Nindyapuspa, A. 2017. *Pozzolan Sebagai Bahan Pengganti Sebagian Semen*. Available at: <https://lingkungan.itats.ac.id/pozzolan-sebagai-bahan-pengganti-sebagian-semen/> (Accessed: 5 July 2023).
- Pemerintah Republik Indonesia. 2014. *Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 101 Tahun 2014 tentang Pengelolaan Limbah B3*. 101. Indonesia.
- Trihadiningrum, Y. 2000. 'Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun', *Jurusan Teknik Lingkungan, FTSP, ITS Surabaya*.
- Wang, J. *et al.* 2019. 'Hazardous waste treatment technologies', *Water Environment Research*, 91(10), pp. 1177–1198. doi: 10.1002/wer.1213.

BAB 8

PEMBUANGAN LIMBAH BAHAN BERBAHAYA DAN BERACUN

Oleh Erwin Prasetya Toepak

8.1 Praktek Baik Pengangkutan Limbah Bahan Berbahaya Dan Beracun

8.1.1 Pendahuluan

Pengangkutan limbah berbahaya terdiri dari komponen kunci dari program Undang-Undang Konservasi dan Pemulihan Sumber Daya (RCRA) yang komprehensif untuk pengelolaan limbah berbahaya. Transportasi paling sering melibatkan pemindahan dari titik pembangkitan ke fasilitas pengolahan, penyimpanan, dan pembuangan (TSDF) yang terdaftar di Badan Perlindungan Lingkungan (EPA). Transportasi merupakan sumber pelepasan potensial yang signifikan ke lingkungan dan paparan terhadap pekerja dan masyarakat; karenanya, peraturan yang menangani prosedur pengiriman limbah yang benar sangat banyak dan komprehensif. Pengangkutan limbah berbahaya diatur berdasarkan peraturan bahan berbahaya RCRA dan Departemen Perhubungan (DOT) di Amerika. Aturan DOT disusun dan dirumuskan untuk mengatur pengangkutan setiap bahan berbahaya, baik produk baru maupun limbah. Peraturan DOT awalnya dirancang untuk mengatasi pengangkutan bahan kimia individu. Akan tetapi, ketika berurusan dengan limbah berbahaya, aliran limbah yang kompleks, terdiri dari banyak bahan kimia dalam berbagai bentuk fisik, dapat diangkut. Akibatnya, program DOT telah dimodifikasi untuk memungkinkan pengelolaan limbah berbahaya dan campurannya. Program DOT membutuhkan

komunikasi bahaya yang sesuai (misalnya, klasifikasi, pelabelan, penandaan, pengemasan, pembuatan plakat) dari bahan yang akan diangkut. Jika limbah berbahaya diangkut untuk pengolahan, penyimpanan, pembuangan, atau reklamasi, penghasil limbah kemudian diklasifikasikan sebagai pengirim oleh DOT dan harus mematuhi peraturan bahan berbahaya.

8.1.2 Moda Pengangkutan Limbah Berbahaya

Tangki kargo adalah pembawa utama bahan berbahaya massal di atas jalan raya; namun, limbah berbahaya dalam jumlah besar dikirimkan dalam drum berukuran 55 galon. Tangki kargo biasanya dibuat dari baja atau paduan aluminium, baja tahan karat, nikel, atau titanium. Kapasitas tangki berkisar dari 15.000 hingga 45.000 L (4.000–12.000 galon). Undang-undang bobot jalan federal Amerika biasanya membatasi bobot kendaraan bermotor hingga 36.000 kg (80.000 lb) bruto. Hampir 155 juta ton bahan kimia diangkut dengan kereta api di Amerika Utara setiap tahunnya, yang merupakan 1,75 juta gerbong bahan berbahaya. Volume bahan berbahaya yang bergerak dengan kereta api meningkat lebih dari dua kali lipat sejak 1980 pada tahun 2007. Klasifikasi utama gerbong tangki kereta api, untuk mengangkut gas dan cairan, adalah tekanan dan non tekanan. Kedua kategori tersebut memiliki beberapa subkelas yang berbeda dalam hal tekanan uji, ada atau tidaknya katup pelepasan dasar, jenis sistem pelepas tekanan, dan jenis pelindung termal. Sembilan puluh persen mobil tangki terbuat dari baja; aluminium juga umum. Kapasitas gerbong tangki yang membawa bahan berbahaya dibatasi hingga 131 Kilo Liter atau berat kotor 119 ton. Sejak penerapan peraturan RCRA, sebagian besar pengangkut limbah B3 termasuk dalam salah satu kategori berikut:

1. Generator yang mengangkut limbahnya ke TSDF
2. Pengangkut kontrak mengumpulkan limbah dari generator dan mengangkutnya ke TSDF

3. Fasilitas TSD mengumpulkan limbah dari generator untuk diangkut kembali ke fasilitas mereka

Pengangkutan limbah berbahaya melalui jalan raya dianggap sebagai metode yang paling serbaguna seperti truk tangki yang dapat memperoleh akses ke sebagian besar generator industri dan fasilitas TSD; pengiriman kereta api, sebaliknya, membutuhkan pemasangan pelapis dinding dan hanya cocok untuk pengiriman dalam jumlah sangat besar.

8.1.3 Persyaratan Transportasi

Kertas pengiriman diperlukan untuk pengangkutan bahan berbahaya. Dokumentasi tersebut memberikan informasi rinci tentang bahan yang diangkut dan potensi bahaya yang terlibat. Merupakan tanggung jawab pengangkut untuk melengkapi surat-surat pengiriman. Meskipun format surat-surat tersebut dapat berbeda-beda, semua wajib mencantumkan rincian berikut untuk setiap bahan berbahaya yang diangkut:

1. Nama pengiriman yang tepat
2. Kelas bahaya atau nomor divisi
3. Identifikasi Limbah B3 yang Diangkut

Ketika limbah berbahaya akan diangkut ke luar lokasi dari titik pembangkitan, pengirim harus mematuhi peraturan untuk identifikasi, klasifikasi, pelabelan, pengemasan, penandaan, plakat, dan dokumentasi pengiriman, yang secara kolektif dikenal sebagai komunikasi bahaya. Tindakan ini dirancang untuk melindungi kesehatan karyawan dan masyarakat setempat yang mungkin terpapar limbah tersebut selama transportasi. Sebagian besar persyaratan terdapat dalam tabel bahan berbahaya DOT. Untuk tujuan kepatuhan keselamatan dan peraturan, semua bahan yang dijadwalkan untuk pengiriman harus diidentifikasi sepenuhnya. Informasi ini juga harus tersedia untuk publik, serta untuk tim

tanggap darurat dan regulator. Persyaratan untuk pengiriman limbah berbahaya yang benar meliputi:

1. Nama pengiriman: Generator (pengirim) harus menentukan nama pengiriman yang tepat dari limbah berbahaya.
2. Kelas bahaya: Ada total 23 kelas bahaya DOT dari material yang dapat diangkut. Generator Harus memilih kelas bahaya yang sesuai.
3. Nomor identifikasi: Generator harus memilih nomor identifikasi yang sesuai dengan nama pengapalan dan kelas bahaya.
4. Label: Generator harus menentukan apakah label diperlukan.
5. Paket: Tentukan jenis paket yang sesuai untuk limbah.
6. Tanda: Terapkan tanda DOT dan EPA yang diperlukan pada paket.
7. Plakat: Pengirim harus menyediakan plakat yang tepat untuk kendaraan pengangkut.
8. Dokumentasi pengiriman: Pengirim harus menyiapkan Manifes Limbah Berbahaya Seragam untuk memverifikasi identifikasi dan klasifikasi bahan yang dikirim.

8.1.4 Informasi Tanggap Darurat

Pengirim diwajibkan untuk memberikan informasi tanggap darurat untuk setiap bahan berbahaya yang tercantum pada kertas pengiriman (misalnya Bill of Lading). Informasi harus mencakup:

1. Deskripsi bahan berbahaya
2. Bahaya langsung terhadap kesehatan
3. Risiko kebakaran atau ledakan
4. Tindakan pencegahan segera yang harus diambil jika terjadi insiden
5. Metode segera untuk menangani kebakaran kecil atau besar
6. Metode awal untuk menangani tumpahan atau kebocoran
7. Tindakan pertolongan pertama awal

8.1.5 Insiden Pengangkutan Bahan Berbahaya

Di Amerika, Dari tahun 2003 hingga 2012, insiden limbah berbahaya di jalan raya mendominasi semua moda transportasi lainnya. Jumlah insiden yang dilaporkan pada tahun 2011 dan 2012 telah meningkat tajam dari tahun 2005–2006. Jumlah total insiden limbah berbahaya di jalan raya berjumlah 1536 dari tahun 2003 hingga 2011. Insiden kereta api berada di urutan kedua selama periode ini, dengan insiden berkisar antara 7 dan 24 per tahun. Dua insiden terkait udara dilaporkan selama periode yang sama. Pembawa bahan berbahaya diwajibkan untuk melaporkan pelepasan tidak disengaja tertentu yang terjadi selama pengangkutan. Pemberitahuan telepon diperlukan segera setiap kali ada insiden bahan berbahaya yang signifikan selama pengangkutan, selama pengangkutan (termasuk pemuatan, pembongkaran, dan penyimpanan sementara), atau penyimpanan yang terkait dengan pengangkutan, di mana hal-hal berikut terjadi:

1. Sebagai akibat langsung dari bahan berbahaya:
 - a. Seseorang terbunuh.
 - b. Seseorang menerima cedera yang membutuhkan rawat inap.
 - c. Perkiraan kerusakan pembawa atau properti lainnya.
 - d. Evakuasi masyarakat umum berlangsung selama satu jam atau lebih.
 - e. Satu atau lebih arteri atau fasilitas transportasi utama ditutup atau ditutup untuk satu jam atau lebih.
 - f. Pola penerbangan operasional pesawat diubah.
2. Terjadi kebakaran, kerusakan, tumpahan, atau dugaan kontaminasi radioaktif.
3. Terjadi kebakaran, kerusakan, tumpahan, atau dugaan kontaminasi yang melibatkan pengiriman bahan infeksius (agen etiologi).
4. Pelepasan polutan laut melebihi 0,45 L untuk cairan atau 0,4 ton untuk padatan.

5. Ada situasi (misalnya, ada bahaya bagi kehidupan di tempat kejadian) sedemikian rupa sehingga, di penilaian operator, itu harus dilaporkan ke DOT.

Setiap pemberitahuan harus diberikan kepada National Response Center melalui telepon. Pemberitahuan yang melibatkan zat menular (agen etiologi) malah dapat diberikan ke Pusat Pengendalian Penyakit atau Layanan Kesehatan Masyarakat. Setiap pemberitahuan harus mencakup:

1. Nama pelapor dan pengangkut
2. Nomor telepon yang dapat dihubungi pelapor
3. Tanggal, waktu, dan lokasi kejadian
4. Tingkat cedera
5. Klasifikasi, nama, dan jumlah bahan berbahaya yang terlibat, jika informasi tersebut tersedia
6. Jenis insiden
7. Apakah ada bahaya yang berkelanjutan bagi kehidupan di tempat kejadian

8.2 Praktik Baik Penggunaan Alat Pelindung Diri

8.2.1 Pendahuluan

Siapa pun yang memasuki lokasi limbah berbahaya yang tidak terkendali harus dilindungi dari potensi bahaya yang mungkin dihadapi. Tujuan dari pakaian pelindung pribadi (PPC) dan alat pelindung diri (APD) adalah untuk melindungi atau mengisolasi individu dari bahaya kimia, fisik, dan biologis yang ditimbulkan oleh lokasi pembuangan. Pemilihan APD yang memadai secara hati-hati harus melindungi:

1. Sistem pernapasan
2. Kulit dan tubuh
3. Wajah dan mata
4. Kaki dan tangan
5. Kepala

6. Pendengaran

Tidak ada satu pun APD, atau kombinasi peralatan dan pakaian apa pun, yang mampu melindungi dari semua ancaman. Faktanya, tidak ada APD yang mampu memberikan perlindungan terhadap satu ancaman saja untuk jangka waktu yang lama. APD harus dianggap sebagai pilihan terakhir untuk perlindungan. Ini harus digunakan bersama dengan metode perlindungan lainnya, seperti prosedur keselamatan, tindakan perbaikan alternatif, dan/atau kontrol teknik. Penggunaan APD dapat menimbulkan bahaya pekerja yang signifikan, seperti tekanan panas, tekanan fisiologis, dan gangguan visibilitas, mobilitas, dan komunikasi. Semakin besar tingkat perlindungan APD, semakin besar risiko yang terkait. Untuk situasi tertentu, peralatan dan pakaian harus dipilih untuk memberikan tingkat perlindungan yang memadai. Overprotection berbahaya dan harus dihindari.

8.2.2 Mengembangkan Program APD

Dua tujuan dasar harus dicapai dalam program APD: (1) mencegah pekerja terpapar bahaya keselamatan dan kesehatan secara berlebihan dan (2) mencegah cedera pada pekerja akibat penggunaan APD yang salah atau tidak berfungsinya APD yang diperlukan. Untuk mencapai tujuan tersebut, program APD yang komprehensif harus ditetapkan. , program APD harus tertulis sebagai bagian dari rencana keselamatan dan kesehatan khusus lokasi. Tidak ada format khusus yang diperlukan, tetapi unsur-unsur berikut harus disertakan:

1. Desain dan penggunaan kontrol teknik dan praktik kerja lokasi yang ditetapkan untuk perlindungan keselamatan dan kesehatan pekerja (diperlukan sejauh memungkinkan untuk mengurangi dan mengontrol potensi paparan pekerja terhadap bahaya keselamatan dan kesehatan)

2. Penentuan tingkat perlindungan yang diperlukan untuk zona kerja yang ditetapkan (konsisten dengan kontrol teknik dan praktik kerja yang dirujuk di atas)
3. Persyaratan untuk pemilihan, penggunaan, dan pemeliharaan peralatan pernapasan
4. Persyaratan untuk pemilihan, penggunaan, dan pemeliharaan ppc
5. Pembentukan ansambel ppe yang diperlukan untuk memberikan tingkat perlindungan pekerja yang diperlukan untuk zona kerja yang ditunjuk

Program APD harus ditinjau setidaknya setiap tahun dan ketika bahaya baru teridentifikasi, kondisi lokasi berubah, atau setelah insiden apa pun yang melibatkan penggunaan APD yang mengakibatkan, atau dapat mengakibatkan, cedera. Saat meninjau program APD, isu-isu berikut harus dipertimbangkan:

1. Jumlah jam-orang yang diperlukan untuk ansambel APD di berbagai tingkat perlindungan
2. Pengalaman kecelakaan dan penyakit
3. Tingkat paparan yang dihadapi
4. Kesesuaian APD, kontrol teknik, dan praktik dan prosedur keselamatan kerja standar
5. Efektivitas praktik dekontaminasi, pembersihan, inspeksi, pemeliharaan, dan penyimpanan APD
6. Biaya program

Hasil tinjauan dan evaluasi program APD harus tersedia bagi karyawan yang terkena dampak dan disampaikan kepada manajemen tingkat atas untuk diterapkan.

8.2.3 Pemilihan Alat Pernapasan

Perlindungan pernapasan sangat penting, karena paru-paru menyajikan area permukaan tubuh yang paling terbuka. Alat pelindung pernapasan (respirator) terdiri dari bagian wajah yang terhubung ke sumber udara atau oksigen. Tiga kategori utama respirator berbeda sehubungan dengan sumber udara atau oksigen:

1. Alat bantu pernapasan mandiri (SCBA) memasok udara dari sumber yang dibawa oleh pengguna.
2. Air-line respirators (ALRs) menyuplai udara dari sumber yang terletak agak jauh dan terhubung ke pengguna melalui selang.
3. Respirator pemurni udara (APR) memungkinkan pengguna untuk menghirup udara sekitar yang telah dimurnikan.

Karena SCBA dan ALR sama-sama menyuplai udara ke pengguna, terkadang keduanya dikategorikan bersama sebagai respirator suplai udara. Respirator selanjutnya dibedakan berdasarkan jenis aliran udara yang disuplai ke bagian muka:

1. Respirator bertekanan negatif (juga disebut sebagai respirator permintaan) menarik udara ke dalam bagian muka melalui tekanan negatif yang diciptakan oleh penghirupan pengguna. Kerugian dari respirator permintaan adalah jika terjadi kebocoran dalam sistem (misalnya retakan pada selang atau penutup muka yang tidak pas), pengguna menarik udara yang terkontaminasi ke dalam penutup muka selama penghirupan.
2. Respirator bertekanan positif (juga disebut sebagai respirator yang membutuhkan tekanan) mempertahankan sedikit tekanan positif pada bagian muka selama inhalasi dan ekshalasi. Pengatur tekanan dan katup pernafasan pada masker menjaga tekanan positif masker setiap saat. Jika terjadi kebocoran, regulator mengirimkan aliran udara bersih secara terus-menerus ke bagian muka, mencegah penetrasi udara ambien yang terkontaminasi. Hanya respirator tekanan positif

yang direkomendasikan untuk bekerja di lokasi limbah berbahaya.

3. Respirator aliran terus-menerus mengirim aliran udara terus-menerus ke bagian muka setiap saat. Aliran udara terus-menerus mencegah infiltrasi oleh udara ambien tetapi menghabiskan pasokan udara jauh lebih cepat daripada respirator tekanan positif atau tekanan negatif.

Faktor perlindungan, dijelaskan dengan angka, menunjukkan tingkat perlindungan keseluruhan yang diberikan oleh respirator. Faktor perlindungan ditentukan oleh kecocokan dan, dengan APR, oleh kemampuan menyaring respirator. Angka tersebut menunjukkan perbedaan relatif konsentrasi zat di luar dan di dalam bagian wajah yang dapat dipertahankan oleh respirator. Misalnya, faktor perlindungan untuk APR masker penuh adalah 100 menurut American National Standards Institute (ANSI). Artinya, secara teoritis, pekerja yang memakai respirator ini harus dilindungi di atmosfer yang mengandung bahan kimia dengan konsentrasi 100 kali lebih tinggi daripada konsentrasi mereka . tingkat yang aman. Faktor proteksi ditentukan dengan uji analitik kuantitatif.

Untuk menentukan apakah SCBA atau ALR memberikan perlindungan yang memadai dalam situasi tertentu, kalikan faktor perlindungan dengan nilai ambang batas (TLV) atau batas paparan yang diizinkan (PEL) untuk bahan kimia di atmosfer. Perlindungan yang memadai diberikan terhadap bahan kimia tertentu jika produk lebih besar dari konsentrasi bahan kimia sekitar yang terukur. (Untuk APR, konsentrasi penggunaan aman maksimum untuk bahan kimia tertentu ditetapkan pada respirator.) Perlu diingat bahwa faktor perlindungan respirator dapat dikompromikan dalam beberapa situasi, terutama (1) jika pekerja memiliki tingkat pernapasan yang tinggi atau (2) jika suhu sekitar tinggi atau rendah. Jika tingkat pernapasan pekerja melebihi enam

puluh tujuh liter per menit, banyak respirator tekanan positif tidak akan mempertahankan tekanan positif selama inhalasi puncak. Kebocoran bagian muka bagian dalam ini terjadi pada ALR dan SCBA. Juga, pada tingkat kerja yang tinggi, katup pernafasan bisa bocor. Akibatnya, respirator tekanan positif yang bekerja pada volume enam puluh tujuh liter per menit atau lebih tidak menawarkan perlindungan lebih dari respirator tekanan negatif yang dilengkapi dengan cara yang sama. Dalam hal faktor perlindungan numerik, ini merupakan pengurangan dari 10.000 menjadi sekitar 50 (Pengurangan perlindungan sebenarnya sulit diperkirakan dan bervariasi dari satu unit ke unit lainnya.) Suhu sekitar yang tinggi atau rendah dapat menyebabkan penurunan faktor perlindungan yang serupa. Sebagai tindakan pencegahan umum, pertimbangkan bahwa faktor perlindungan dapat menurun pada suhu di bawah 60°F atau di atas 90°F. Perhatikan bahwa suhu di dalam setelan enkapsulasi penuh, di mana SCBA mungkin dipakai, dapat melebihi 90°F.

8.2.4 Pemilihan PPC

Pakaian dianggap sebagai barang yang menawarkan perlindungan kulit dan/atau tubuh. Ini termasuk yang berikut:

1. Setelan enkapsulasi penuh
2. Setelan nonenkapsulasi
3. Celemek, legging, dan pelindung lengan
4. Sarung tangan
5. Pakaian pelindung petugas pemadam kebakaran
6. Pakaian kedekatan atau pendekatan
7. Pakaian ledakan dan fragmentasi
8. Pakaian pendingin
9. Pakaian antiradiasi

Setiap jenis PPC memiliki tujuan tertentu. Banyak, tetapi tidak semua PPC, dirancang untuk melindungi dari paparan bahan

kimia. Pakaian pelindung bahan kimia (BPK) tersedia dalam berbagai bahan yang menawarkan berbagai ketahanan terhadap berbagai bahan kimia. Bahan pakaian yang paling tepat akan bergantung pada bahan kimia yang ada. Idealnya, bahan yang dipilih tahan terhadap degradasi (reaksi kimia antara bahan kimia dengan bahan yang mengakibatkan kerusakan bahan) dan perembesan (rembesan zat kimia melalui bahan). Tidak ada bahan yang melindungi dari semua bahan kimia dan kombinasi bahan kimia, dan tidak ada bahan yang merupakan penghalang yang efektif untuk paparan bahan kimia yang berkepanjangan. Seleksi adalah tugas yang kompleks dan harus dilakukan oleh personel dengan pelatihan dan pengalaman. Pemilihan APD umumnya terjadi dalam tiga keadaan berikut: (1) kontaminan diidentifikasi atau diklasifikasikan; (2) kontaminan tidak diketahui; dan (3) ada bahaya khusus yang memerlukan APD khusus. Dalam semua kondisi, PPC dipilih dengan mengevaluasi karakteristik kinerja pakaian terhadap persyaratan dan batasan kondisi spesifik lokasi dan tugas. Setelah bahan kimia diidentifikasi, konsultasikan dengan sumber informasi yang tersedia untuk menentukan ketahanan setelan terhadap perembesan dan degradasi oleh bahan kimia yang diketahui dan karakteristik perpindahan panasnya seperti yang dijelaskan di bawah ini. Gunakan informasi ini untuk mempersempit opsi yang sesuai. Kemudian, jika memungkinkan, periksa secara fisik pakaian perwakilan sebelum membeli dan diskusikan faktor penggunaan dan kinerja dengan seseorang yang memiliki pengalaman sebelumnya dengan pakaian yang sedang dipertimbangkan.

8.3 Praktik Baik Pembuangan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun Di Lahan

8.3.1 Pendahuluan

Sekitar 2 juta ton limbah berbahaya dibuang ke tanah setiap tahun di Amerika. Pembuangan tanah dapat terjadi pada atau sedikit di bawah permukaan tanah, yaitu di TPA atau unit berbasis lahan lainnya, atau dapat terjadi jauh di bawah permukaan bumi, misalnya dengan injeksi sumur dalam. Sistem pembuangan berbasis lahan modern untuk limbah berbahaya dirancang dan dilengkapi dengan berbagai perlindungan dan diatur secara ketat; namun, jika limbah berbahaya tidak diolah dengan benar sebelum dibuang, limbah tersebut masih dapat mencemari tanah setempat, air tanah, dan air permukaan. Selain itu, air hujan, pencairan salju, dan air tanah dapat menembus TPA, termasuk limbah berbahaya yang dibuang, dan berpotensi memobilisasi zat berbahaya. Pembatasan pembuangan tanah (LDR) berlaku untuk: (1) penghasil limbah berbahaya (termasuk limbah pembersih); (2) pengangkut limbah B3; (3) fasilitas pengolahan, penyimpanan, dan pembuangan limbah berbahaya (TSDF); dan (4) fasilitas daur ulang limbah berbahaya. Pembatasan tidak berlaku untuk generator yang menghasilkan kurang dari 100 kg limbah berbahaya per bulan (mengecualikan generator dalam jumlah kecil dengan syarat). Berdasarkan LDR, penghasil limbah berbahaya, TSDF, dan fasilitas daur ulang harus memenuhi persyaratan khusus untuk analisis limbah, penyimpanan catatan, pemberitahuan, dan sertifikasi. Seragam Manifes Limbah B3 untuk limbah LDR harus disertai dengan notifikasi LDR. LDR adalah formulir pemberitahuan satu kali yang ditandatangani oleh pembangkit dan menunjukkan bahwa mereka memahami bahwa limbah ini tidak dapat dibuang ke tanah. Generator bertanggung jawab untuk menyediakan manifes dan LDR. Sebagian besar kontraktor pembuangan limbah berbahaya menyediakan satu atau kedua formulir.

8.3.2 Gedung Penampungan

Dalam keadaan terbatas, limbah berbahaya dapat disimpan dalam tumpukan di dalam gedung penampungan. Persyaratan untuk pengoperasian gedung penampungan yang benar adalah sebagai berikut.

1. Disertifikasi oleh Insinyur Profesional terdaftar.
2. Sepenuhnya tertutup untuk mencegah paparan elemen.
3. Dengan kekuatan yang cukup untuk mendukung limbah dan setiap personel dan alat berat yang beroperasi di dalam unit.
4. Dilengkapi dengan penampung sekunder dan sistem pengumpulan jika ada limbah cair.
5. Dirancang dan dioperasikan untuk mencegah emisi debu buronan. Tindakan pencegahan khusus (misalnya , tekanan udara negatif untuk mencegah pelepasan ke luar) mungkin diperlukan.
6. Diinspeksi secara rutin.

8.3.3 Persyaratan Tempat Pembuangan Akhir B3 Yang Aman

Pembatasan Pembuangan Lahan (LDR) LDR berlaku untuk: (1) penghasil limbah berbahaya (termasuk pembersihan limbah); (2) pengangkut limbah B3 ; (3) fasilitas pengolahan, penyimpanan, dan pembuangan limbah berbahaya (TSDF); dan (4) fasilitas daur ulang limbah berbahaya. Pembatasan tidak berlaku untuk generator yang menghasilkan kurang dari 100 kg limbah berbahaya per bulan (mengecualikan generator dalam jumlah kecil dengan syarat). Berdasarkan LDR, penghasil limbah berbahaya, TSDF, dan fasilitas daur ulang harus memenuhi persyaratan khusus untuk analisis limbah, penyimpanan catatan, pemberitahuan, dan sertifikasi. Seragam Manifes Limbah B3 untuk limbah LDR harus disertai dengan notifikasi LDR. LDR adalah formulir pemberitahuan satu kali yang ditandatangani oleh pembangkit dan menunjukkan bahwa mereka memahami bahwa limbah ini tidak dapat dibuang ke tanah. Generator bertanggung jawab untuk

menyediakan manifest dan LDR. Sebagian besar kontraktor pembuangan limbah berbahaya menyediakan satu atau kedua formulir.

TPA yang aman harus memiliki sistem liner yang dibangun dan dipasang untuk mencegah migrasi limbah keluar dari TPA selama masa aktifnya dan selama periode penutupan. Sistem liner harus mencakup:

1. Lapisan atas (lapisan primer) terbuat dari bahan (misalnya, lapisan geosintetik atau lapisan membran fleksibel) untuk mencegah migrasi konstituen berbahaya selama masa aktif dan periode perawatan pascapenutupan.
2. Lapisan dasar komposit (lapisan sekunder) yang terdiri dari setidaknya dua komponen. Komponen atas biasanya merupakan liner geosintetik. Komponen yang lebih rendah harus dibangun dari bahan untuk meminimalkan migrasi konstituen berbahaya jika terjadi kerusakan pada komponen atas. Komponen bawah harus dibuat dari bahan tanah padat paling sedikit 91 cm (3 ft) dengan konduktivitas hidrolis 1×10^{-7} cm /s atau kurang.

Sistem LCR dipasang tepat di atas lapisan atas (primer) untuk mengumpulkan dan membuang lindi selama masa aktif dan masa perawatan pascapenutupan TPA. Sistem LCR sekunder ditempatkan di atas lapisan komposit. LCR sekunder berfungsi juga sebagai sistem pendeteksi kebocoran dan harus mampu mendeteksi, mengumpulkan, dan menghilangkan kebocoran konstituen berbahaya melalui top liner sedini mungkin. Badan pengatur negara menetapkan desain dan kondisi pengoperasian dalam izin untuk memastikan bahwa kedalaman lindi di atas lapisan tidak melebihi 30 cm (1 kaki). Persyaratan untuk sistem deteksi kebocoran meliputi :

1. Dibangun dengan kemiringan dasar 1% atau lebih.

2. Dibangun dari bahan drainase granular dengan konduktivitas hidrolis jenuh 1×10^{-2} cm /s atau lebih dan ketebalan 30,5 cm (12 in.) atau lebih; atau dibuat dari bahan drainase sintetik atau geonet dengan transmisivitas 3×10^{-5} m²/s atau lebih.
3. Dibangun dari bahan yang tahan secara kimiawi terhadap limbah yang ada di TPA dan lindi yang diperkirakan akan dihasilkan, serta memiliki kekuatan dan ketebalan yang cukup untuk mencegah keruntuhan di bawah tekanan yang diberikan oleh limbah di atasnya, bahan penutup limbah, dan peralatan berat yang digunakan.
4. Dirancang dan dioperasikan untuk meminimalkan penyumbatan selama masa aktif dan periode perawatan pascapenutupan.
5. Dibangun dengan sump dan pompa dengan ukuran yang cukup untuk membuang cairan dari sump dan mencegah cairan kembali ke lapisan drainase. Setiap unit harus memiliki bah sendiri. Semua cairan yang dapat dipompa harus dibuang di bak sistem deteksi kebocoran untuk meminimalkan tekanan pada lapisan bawah.

Desain alternatif dan praktik pengoperasian diizinkan oleh badan perizinan jika mereka secara memadai mencegah migrasi konstituen berbahaya ke dalam air tanah atau air permukaan. Faktor-faktor yang perlu dipertimbangkan dengan desain alternatif termasuk karakteristik dan jumlah limbah, dan pengaturan hidrogeologi fasilitas, termasuk kemampuan liner dan tanah untuk menipiskan kontaminan yang mungkin terlindi. Persyaratan lapisan ganda dapat dicabut untuk fasilitas limbah berbahaya dalam kondisi tertentu, misalnya, jika TPA:

1. Hanya mengandung limbah berbahaya dari kontrol emisi tungku pengecoran atau pasir cetakan pengecoran logam
2. Memiliki setidaknya satu liner utuh

3. Terletak lebih dari seperempat mil dari sumber air minum bawah tanah (USDW)
4. Sesuai dengan persyaratan pemantauan air tanah yang berlaku. Tindakan pencegahan juga diperlukan untuk pengelolaan cairan permukaan yang tepat, termasuk run-on dan run-off. Fasilitas harus merancang, membangun, dan mengoperasikan sistem kendali berjalan yang mampu mencegah aliran ke bagian aktif TPA selama debit puncak setidaknya dari badai 25 tahun. Selain itu, sistem pengelolaan limpasan harus dipasang untuk mengumpulkan dan mengontrol volume air yang dihasilkan dari badai 24 jam 25 tahun.

Setelah TPA aman atau sel selesai, itu harus ditutup dari lingkungannya. Di bawah Amandemen Limbah Berbahaya dan Padat (HSWA), ada banyak persyaratan untuk mencegah masuknya air ke TPA dan untuk mengalihkan dan membuang cairan permukaan. Penutup TPA yang aman terdiri dari beberapa lapisan. Penutup tanah liat yang padat ditempatkan langsung di atas sampah. Ini dipadatkan oleh mesin berat untuk mengurangi ukuran pori dan dengan demikian memperlambat konduktivitas hidrolik. Setelah grading, tutup geomembran dipasang di atas lapisan tanah liat. Sistem pengumpulan dan pembuangan air permukaan (SWCR) ditempatkan di atas sistem liner komposit ini. Terakhir, lapisan tanah yang mendukung vegetasi berakar dangkal dipasang sebagai lapisan paling atas.

8.3.4 Kompatibilitas Liner Dengan Limbah B3

Kompatibilitas kimia geomembran dengan lindi limbah merupakan pertimbangan kritis terkait pemilihan material. TPA yang aman dianggap sebagai tempat penyimpanan permanen untuk limbah berbahaya; oleh karena itu, bahan yang digunakan dalam konstruksinya diharapkan dapat menahan berbagai tekanan alami untuk waktu yang sangat lama. Banyak bahan yang

memburuk dari waktu ke waktu saat terpapar bahan kimia yang terjadi di lindi berbahaya dan tidak berbahaya. Pemilik dan operator TPA harus mengantisipasi komposisi lindi yang akan dihasilkan suatu lokasi dan memilih bahan liner yang sesuai. Ketahanan bahan kimia dari setiap bahan geomembran, serta pipa LCR, harus dinilai secara menyeluruh sebelum pemasangan.

Bahan pelapis sintetis atau pelapis geomembran terdiri dari polimer yang merupakan senyawa alami atau sintetis dengan berat molekul tinggi. Bahan polimer yang biasa digunakan dalam konstruksi geomembran meliputi:

1. Termoplastik—polivinil klorida (PVC)
2. Termoplastik kristal—polietilen densitas tinggi (HDPE) dan polietilen densitas rendah linier (LLDPE)
3. Elastomer termoplastik—polietilen terklorinasi (CPE) dan polietilen klorolsulfonat (CSPE)
4. Elastomer—neoprena dan etilena propilena diena monomer (EPDM)

Membran mengandung berbagai minyak dan bahan pengisi yang membantu pembuatan geomembran; aditif ini selanjutnya mempengaruhi kinerja secara keseluruhan. Kompatibilitas kimiawi, karakteristik tegangan-regangan, survivabilitas, dan permeabilitas adalah masalah kritis yang harus diperhatikan saat memilih geomembran. polimer yang paling umum digunakan dalam geomembran adalah HDPE, LLDPE, PVC, flexible polypropylene (fPP), dan CSPE. Formulasi yang disukai untuk geomembran HDPE dan PVC. Geomembran HDPE yang lebih tebal diperlukan karena sejumlah alasan, termasuk kemampuan untuk mengelas tanpa merusak liner, peningkatan regangan pada hasil tarik, ketahanan retak tegangan yang lebih besar, dan kerentanan yang lebih kecil terhadap pelipatan, yang dapat menyebabkan retak tegangan. Keuntungan utama membran HDPE adalah ketahanan kimianya yang lebih tinggi terhadap hidrokarbon dan

pelarut. Perbedaan ketahanan kimia antara HDPE dan PVC mungkin signifikan untuk hidrokarbon alifatik dan aromatik, dan pelarut minyak bumi terklorinasi, teroksigenasi, dan minyak mentah. Sifat semikristalin dari HDPE dapat membuatnya lebih rentan terhadap stress cracking ketika berada di bawah tekanan dengan adanya leachate. Pabrikasi terus mengembangkan resin yang lebih tahan terhadap stress cracking, serangan kimia, dan oksidasi, serta lebih hemat biaya.

8.4 Dasar Hukum Pembuangan Limbah Bahan Berbahaya Dan Beracun

Pembuangan limbah bahan berbahaya dan beracun atau yang biasa disebut limbah B3 didasarkan pada Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor 6 Tahun 2021 Tentang Tata Cara Dan Persyaratan Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya Dan Beracun. Pembuangan limbah B3 wajib mendapatkan surat ijin dari pemerintah sebelum dapat membuang limbah seperti yang tertuang dalam pasal 197. Pada Pasal 200 dijelaskan beberapa dokumendan ketentuan yang perlu dipersiapkan sebelum membuang limbah B3 yakni :

1. Dokumen persyaratan dari Limbah B3 sebelum dilakukan pembuangan;
2. Dokumen yang menunjukkan letak lokasi pembuangan;
3. Tata cara melakukan pembuangan; serta
4. Dokumen yang menunjukkan teknik dan hasil pemantauan lingkungan.

Limbah B3 yang akan dibuang harus dinteralisir terlebih dahulu sesuai pasal 201 untuk menurunkan tingkat toksisitas limbah sesuai ambang batas yang aman. Beberapa parameter yang menjadi indikator dalam melihat penurunan tingkat toksisitas limbah adalah hasil uji toksikologi LC₅₀ dan teratogenisitas. Pengujian toksikologi diatur pada pasal 202 yang memuat

ketentuan bahwa dalam uji Toksikologi LC₅₀ usia penggunaan dari hewan uji yakni *Penaeus sp* mesti berumur 10 sampai 15 hari. Pengujian ini dilakukan selama sembilan puluh enam jam. Sementara itu, uji teratogenitas diatur pada pasal yang sama. Pada uji teratogenitas dilakukan dengan menggunakan Metode nomor 1005.0 (EPA-821-R-02-014, October 2002) yang dikeluarkan oleh United States– Environmental Protection Agency (US-EPA). Adapun hewan uji yang digunakan adalah *cyprinodont variegatus*. Pada pasal 23 ayat 3 dijelaskan apabila hewan uji teratogenitas yakni *cyprinodont variegatus* tidak ditemukan di Indonesia maka dapat digunakan hewan endemic Indonesia yang telah memenuhi persyaratan sensitivitas oleh lembaga berkompeten di bidang penelitian kelautan. Durasi pengujian terhadap limbah B3 diatur dalam Pasal 203. Pada pasal ini disebutkan bahwa pengujian dilakukan paling sedikit satu kali selama dilakukannya proses pembuangan limbah B3 untuk pengujian pH, total konsentrasi zat yang tercemar, nilai LC₅₀, dan uji teratogenitas.

Ketentuan terkait hasil uji limbah B3 yang telah dilakukan proses netralisasi atau proses penurunan kadar racun diatur pada pasal 204. Pada pasal ini diatur ketentuan terkait hasil uji yang memenuhi ketentuan dapat dibuang yakni :

1. Nilai dari hasil uji LC₅₀ mesti lebih besar dari konsentrasi 30.000 ppm spp
2. Derajat keasaman (pH) yang terukur berkisar antara tujuh sampai dengan sepuluh untuk kategori limbah B3 yang berupa tailing;
3. Hasil uji teratogenitas tidak menunjukkan adanya sifat teratogenik, untuk kategori limbah B3 berupa tailing;

Pada pasal Pasal 205 dijelaskan mengenai lokasi dari pembuangan limbah B3 yakni :

1. Lokasinya terletak di dasar laut di mana laut tersebut yang memiliki lapisan termoklin yang permanen;

2. Wadah pembuangannya tidak berada di lokasi tertentu yang sensitif;
3. Pada lokasi pembuangan rona awal dari kualitas air laut harus memenuhi baku mutu air laut.

DAFTAR PUSTAKA

- Blackman, William C Jr. 2001. *Basic Hazardous Waste Management 3rd ed.* Florida: Lewis Publisher.
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. 2021. Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor 6 Tahun 2021 Tentang Tata Cara dan Persyaratan Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. Jakarta.
- Mayhew, J.J., G.M. Sodear, dan Carroll, D.W. 1982. *A Hazardous Waste Site Management Plan.* Washington : Chemical Manufactures Association.
- Nicholas P. Cheremisinoff dan Paul N. Cheremisinoff. 1996. *Hazardous Materials and Waste Management: A Guide for the Professional Hazards Manager.* New York : William Andrew Publishing.
- Schwope, A.D., P.P. Costas, J.O. Jackson, and D.J. Weitzman. 1987. *Guidelines for the Selection of Chemical Protective Clothing 3rd ed.* <https://law.resource.org/pub/us/cfr/ibr/001/acgih.guidelines.1987.pdf>
- United States Transportation Command. 2023. *Defense Transportation Regulation* https://www.ustranscom.mil/dtr/part-ii/dtr_part_ii_204.pdf
- U.S. EPA. 1989. *Requirements For Hazardous Waste Landfill Design, Construction And Closure, EPA/625/4-89/022.* [https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?Lab=NRMRL&dirEntryId=40449.](https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?Lab=NRMRL&dirEntryId=40449)

BIODATA PENULIS



Drs. Bambang Suhartawan, M.MT

Dosen Jurusan Teknik Lingkungan
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Universitas Sains dan Teknologi Jayapura

Penulis lahir di Blitar tanggal 13 Pebruari 1964. Penulis adalah dosen tetap dengan status PNS-DPK pada Jurusan Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan (FTSP) Universitas Sains dan Teknologi Jayapura. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Program Studi Kimia Jurusan Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (MIPA) Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan Universitas Cenderawasih Jayapura pada tahun 1989. Pendidikan Pasca Sarjana diperoleh dari Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya jurusan Manajemen Teknik Lingkungan pada tahun 2002.

BIODATA PENULIS



Hasti Suprihatin, S.T, M.T.

Dosen Program Studi Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Gresik

Penulis lahir di Surabaya tanggal 12 Mei 1966. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik, Universitas Gresik. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Teknik Penyehatan dan Lingkungan di Institut Teknologi Pembangunan Surabaya dan melanjutkan S2 pada Jurusan Teknik Lingkungan di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Penulis menekuni bidang menulis dalam rangka meningkatkan kualitas dalam melaksanakan Tri Dhrma Perguruan Tinggi, untuk menunjang kegiatan sebagai dosen dan untuk mengabdikan sebagai dosen untuk mahasiswa serta masyarakat yang membutuhkan.

BIODATA PENULIS



Dr. Nururrahmah Hammado, M.Si.

Dosen Program Studi Teknik Lingkungan
Universitas Syekh Yusuf Al Makassar Gowa

Penulis lahir di Ujung Pandang tanggal 9 Mei 1978. Penulis menyelesaikan pendidikan S1 di Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Universitas Negeri Makassar tahun 2002. Pada tahun 2006 menyelesaikan studi pada Program Studi Ilmu Kimia Program Pascasarjana Universitas Hasanuddin, dan pada tahun 2022 menyelesaikan studi pada program studi Doktor Ilmu Lingkungan Universitas Diponegoro. Saat ini penulis adalah dosen Kimia Lingkungan pada Program Studi Teknik Lingkungan Universitas Syekh Yusuf Al Makassar Gowa. Bidang kajian dan penelitian yang ditekuni oleh penulis adalah Kimia Lingkungan terutama pencemaran air dan pengolahan limbah, Kimia Bahan Alam, dan Energi Baru Terbarukan (EBT).

BIODATA PENULIS



Dr. Hafidawati.,STp.,MT

Dosen Program Studi Teknik Lingkungan
Fakultas Teknik Universitas Riau

Penulis lahir di Bukittinggi tanggal 11 Oktober 1972. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Teknik Lingkungan Fakultas Teknik, Universitas Riau. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Teknologi Industri Pertanian di Institut Pertanian Bogor dan melanjutkan S2 dan S3 pada Jurusan Teknik Lingkungan Institut Teknologi Bandung. Penulis menekuni bidang Pengelolaan Kualitas Lingkungan, terkait dengan pengelolaan Biomassa pertanian dan tinjauan dampak terhadap kualitas udara. Beberapa penelitian yang telah dilakukan terkait pengelolaan limbah dari industri Sagu untuk sumber energi baru .

BIODATA PENULIS



Dr. dr. Elsa Yuniarti, S.Ked, M.Biomed, AIFO-K
Dosen Program Studi Biologi
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Negeri Padang

Penulis lahir di Bandung tanggal 23 Juni 1982 . Penulis bertempat tinggal di Kelurahan Gunung Pangilun Kecamatan Padang Utara Kota Padang Provinsi Sumatera Barat. Telah menyelesaikan studi strata satu di Program Studi Kedokteran Universitas Andalas (2000 – 2006). Lulus strata dua di Program Studi Ilmu Biomedik Universitas Andalas (2011 – 2014). Lulus strata tiga di Program Studi Ilmu Lingkungan Universitas Negeri Padang (2019 – 2022).

Dan telah berkarir lama menjadi dosen di Universitas Negeri padang. Beliau sangat aktif dalam bidang akademik, penelitian, pengabdian masyarakat dan penulisan karya ilmiah, serta telah banyak berpartisipasi di berbagai kegiatan.

BIODATA PENULIS



Isran Asnawi, S.Si., M.T.

Dosen Program Studi Teknik Kimia Mineral
Politeknik Industri Logam Morowali

Penulis lahir di Bulukumba, Sulawesi Selatan, tanggal 9 Januari 1991. Penulis merupakan dosen tetap di Program Studi Teknik Kimia Mineral, Politeknik Industri Logam Morowali. Penulis telah menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Kimia Universitas Hasanuddin dan melanjutkan S2 pada Jurusan Teknik Kimia Universitas Muslim Indonesia. Pada tahun 2018, penulis mulai berkarir sebagai dosen di Politeknik ATI yang kemudian menjadi dosen tetap di Politeknik Industri Logam Morowali hingga saat ini. Penulis menekuni beberapa rumpun bidang ilmu kimia, seperti kimia analisis, teknik kimia, kimia lingkungan, dan mikrobiologi. Penulis juga aktif sebagai ketua Satuan Penjamin Mutu Internal di perguruan tinggi saat ini.

BIODATA PENULIS



Erwin Prasetya Toepak, S.Si., M.Si.

Dosen Program Studi Kimia

Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan alam Universitas
Palangka Raya

Penulis menyelesaikan studi S1 di Program Studi Kimia, FMIPA, Universitas Brawijaya tahun 2013. Kemudian pada tahun 2017, penulis menyelesaikan studi S2 Program Studi Magister Ilmu Kimia, FMIPA, Universitas Indonesia. Pada tahun 2018-hingga sekarang, penulis bekerja sebagai dosen tetap pada Program Studi Kimia Universitas Palangka Raya. Selama kuliah, penulis aktif dalam organisasi, seperti PMK Philadelfia, HMJ Kimia Universitas Brawijaya dan BEM FMIPA Universitas Brawijaya. Penulis aktif dalam menulis di berbagai jurnal nasional maupun internasional yang telah terindeks SCOPUS, Google Scholar, dan juga SINTA.