

TEKNOLOGI PENGELOLAAN LIMBAH



- Nurhayati
- Theresia Evila Purwanti Sri Rahayu
- Didiek Hari Nugroho
- Dedy Eko Rahmanto

TEKNOLOGI PENGELOLAAN LIMBAH

Nurhayati
Theresia Evila Purwanti Sri Rahayu
Didiek Hari Nugroho
Dedy Eko Rahmanto



CV HEI PUBLISHING INDONESIA

TEKNOLOGI PENGELOLAAN LIMBAH

Penulis:

Nurhayati

Theresia Evila Purwanti Sri Rahayu

Didiek Hari Nugroho

Dedy Eko Rahmanto

ISBN: 978-634-7067-28-9

Editor : Afridon, ST, M.Si

Penyunting : Naldi Chandra, S.ST, M.Si

Desain Sampul dan Tata Letak : Ipah Kurnia Putri S.St

Penerbit : CV HEI PUBLISHING INDONESIA

Nomor IKAPI 043/SBA/2023

Redaksi :

Jl. Air Paku No.29 RSUD Rasidin, Kel. Sungai Sapih, Kec Kuranji

Kota Padang Sumatera Barat

Website : www.HeiPublishing.id

Email : heipublishing.id@gmail.com

Cetakan pertama, Januari 2025

Hak cipta dilindungi undang-undang

Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk
dan dengan cara apapun tanpa izin tertulis dari penerbit.

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Allah subhanahu wa'taala atas rahmat dan karunia-Nya sehingga buku "Teknologi Pengelolaan Limbah", dapat terselesaikan dengan baik. Buku ini berisikan tentang Limbah dan Klasifikasinya, Teknologi Pengelolaan Limbah Padat, Teknologi Pengolahan Limbah Cair, Pemanfaatan Limbah sebagai Sumber Energi Alternatif (*Waste to Energy*).

Semoga buku ini dapat menjadi referensi yang bermanfaat bagi mahasiswa, dosen, dan para profesional di bidang Teknologi Pengelolaan Limbah, serta siapa saja yang tertarik mempelajari Teknologi Pengelolaan Limbah. Terima kasih kepada semua pihak yang telah berkontribusi dalam penyusunan buku ini, Harapan terbesar buku ini dapat memberikan manfaat dan kontribusi positif dalam perkembangan ilmu pengetahuan. Selamat membaca dan semoga bermanfaat.

Padang, Januari 2025

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR TABEL.....	iv
DAFTAR GAMBAR	v
BAB 1 LIMBAH DAN KLASIFIKASINYA.....	1
1.1 Definisi Limbah.....	1
1.2 Klasifikasi Limbah Berdasarkan Wujudnya	2
1.3 Klasifikasi Limbah Berdasarkan Senyawa Penyusunnya	3
1.4 Klasifikasi Limbah Berdasarkan Sumbernya.....	7
1.5 Dampak Paparan Limbah bagi Kesehatan.....	10
DAFTAR PUSTAKA.....	12
BAB 2 TEKNOLOGI PENGELOLAAN LIMBAH PADAT	13
2.1 Pendahuluan.....	13
2.2 Hierarki Pengelolaan Limbah Padat	13
2.3 Teknologi Pengelolaan dan Pengolahan Limbah Padat .	15
2.4 Faktor-Faktor Yang Mengatur Pemilihan Teknologi	36
DAFTAR PUSTAKA.....	38
BAB 3 TEKNOLOGI PENGOLAHAN LIMBAH CAIR	
AMONIA INDUSTRI	39
3.1 Latar Belakang	39
3.2 Konsep Teoritis	40
3.3 Tujuan Teknologi Pengolahan Limbah Amonia Cair Industri.....	42
3.4 Manfaat Kolom Penyisihan Limbah Amonia	43
3.5 Keunikan Kolom Gelembung Pancaran Untuk Menyisihkan Limbah Amonia Cair	45
3.6 Perhitungan Koefisien Perpindahan Massa (K_a) dan Efisiensi Penyisihan Amonia	47
3.7 Spesifikasi Kolom Gelembung Pancaran.....	48
3.8 Bahan Baku Pengolahan Limbah Amonia Cair	49
3.9 Proses Pelaksanaan Teknologi Pengolahan Limbah Amonia Cair	50
3.10 Hasil dan Pengolahan Data Penyisihan Amonia	51
3.11 Prospek Inovasi Kolom Gelembung Pancaran	56

DAFTAR PUSTAKA.....	58
BAB 4 PEMANFAATAN LIMBAH SEBAGAI SUMBER	
ENERGI ALTERNATIF (WASTE TO ENERGY)	59
4.1 Pendahuluan.....	59
4.2 Limbah Padat sebagai Sumber Energi	60
4.2.1 Nilai Kalor Limbah Biomassa	60
4.2.2 Pembriketan Limbah Biomassa	62
4.2.3 Sampah Padat untuk Pembangkit Listrik	63
4.3 Limbah Cair sebagai Sumber Energi.....	64
4.4 Limbah B3 sebagai Sumber Energi	66
4.5 Limbah Panas sebagai Sumber Energi Alternatif	68
4.5.1 Pemanfaatan Limbah Panas Gas Buang Motor Bakar	68
4.5.2 Pemanfaatan Panas buang Mesin Pendingin Ruangan	71
4.5.3 Pemanfaatan Energi Terbuang dari Beban Komplemen Mikrohidro.....	74
DAFTAR PUSTAKA.....	77
BIODATA PENULIS	

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1. Spesifikasi teknis kolom gelembung pancaran	48
Tabel 3.2. Data hasil penyisihan konsentrasi amonia terhadap waktu.....	52
Tabel 4.1. Daftar Nilai Kalor Beberapa Jenis Biomassa.....	62

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. Limbah padat (kiri), limbah cair (tengah) dan limbah gas (kanan)	2
Gambar 1.2. Limbah organik (kiri), limbah anorganik (tengah) dan limbah B3 (kanan)	4
Gambar 1.3. Logo macam-macam limbah B.....	35
Gambar 1.4. Limbah domestik (kiri atas), limbah industri (tengah atas) dan limbah pertanian (kanan atas), limbah elektronik (kiri bawah), limbah medis (kanan bawah)	8
Gambar 1.5. Leaflet peringatan akan bahaya limbah air bagi kesehatan.....	11
Gambar 2.1. Hierarki prioritas pengelolaan limbah.....	13
Gambar 2.2. Proses pengomposan.....	18
Gambar 2.3. Diagram skematik proses gasifikasi	23
Gambar 2.4. Diagram skematik proses pirolisis.....	26
Gambar 2.5. Diagram skematik proses insinerasi	29
Gambar 3.1. Kolom Gelembung Pancaran	48
Gambar 3.2. Diagram alir penyisihan kadar amonia yang terkandung dalam limbah cair industry.....	51
Gambar 3.3. Grafik laju perubahan konsentrasi amonia terhadap waktu <i>stripping</i>	53
Gambar 3.4. Grafik laju perubahan $-\ln = (C_i/C_0)$ terhadap waktu <i>stripping</i>	54
Gambar 3.5. Pengaruh waktu <i>stripping</i> terhadap efisiensi ammonia	55
Gambar 4.1. Grafik hubungan antara kandungan lignin dan nilai kalor dari sampel biomassa	61
Gambar 4.2. Hasil uji kuat tekan briket serbuk gergajian kayu bayur dengan perekat daun biduri	63
Gambar 4.3. Skema pembangkit listrik tenaga sampah.....	64
Gambar 4.4. Skema Reaktor Biogas ASBR	65
Gambar 4.5. Diagram alir produksi etanol dari molase tebu...	66
Gambar 4.6. Diagram alir pembuatan biodiesel dari minyak jelantah	68

Gambar 4.7. Aliran Energi pada motor bakar	69
Gambar 4.8. Turbin uap dari panas gas buang motor bakar ...	70
Gambar 4.9. Skema pemanfaatan panas buang motor bakar untuk pengeringan	71
Gambar 4.10. Grafik hubungan antar laju aliran udara kondensor dengan kenaikan suhu udara keluaran kondensor pada AC 1 PK.....	72
Gambar 4.11. Alat pengering dengan memanfaatkan panas kondensor AC	72
Gambar 4.12. Grafik hubungan suhu udara keluaran kondensor AC dan nilai EER.....	73
Gambar 4.13. Skema pemanas air dengan memanfaatkan energi kondensor AC.....	74
Gambar 4.14. Skema pemanfaatan energi listrik beban komplemen PLTMH.....	76

BAB 1

LIMBAH DAN KLASIFIKASINYA

1.1 Definisi Limbah

Limbah didefinisikan menurut beberapa sumber. Menurut KBBI (Kamus Besar Bahasa Indonesia), limbah adalah sisa proses produksi, bahan yang tidak memiliki nilai, tidak berharga, atau barang rusak/cacat dalam proses produksi. Menurut Peraturan Perundang-Undangan Indonesia mendefinisikan limbah yang diatur dalam Undang-Undang PPLH (Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup) Nomor 32 Tahun 2009, yakni limbah adalah sisa suatu usaha dan/atau kegiatan. *World Health Organization* (WHO) mendefinisikan limbah sebagai sebagai sesuatu yang tidak berguna, tidak disukai atau disenangi, tidak terpakai, atau barang itu sudah dibuang akibat tidak bisa dipakai lagi yang berasal dari kegiatan manusia. Definisi limbah berdasarkan Konvensi Basel 1989 oleh UNEP (*United Nations Environment Programme*), bahwa limbah adalah sesuatu bahan/benda yang dibuang, atau akan dibuang, atau diwajibkan untuk dibuang menurut ketentuan hukum nasional.

Pemerintah Indonesia mengatur perihal limbah seperti pada Keputusan Menperindag Republik Indonesia No. 231/MPP/Kep/7/1997 Pasal I tentang prosedur impor limbah, yang menyebutkan bahwa limbah adalah barang atau bahan sisa dan bekas dari kegiatan atau proses produksi yang fungsinya sudah berubah. Selain itu dituangkan pula pada Peraturan Pemerintah No. 18/1999 Jo.PP 85/1999, yang mendefinisikan limbah sebagai sisa atau buangan dari suatu usaha dan atau kegiatan manusia yang berarti barang sisa dari suatu kegiatan atau proses yang sudah tidak berguna atau kurang bahkan tidak memiliki nilai lagi.

Pembangunan berkelanjutan telah menjadi kebutuhan mendesak selama beberapa tahun terakhir karena semua masalah yang disebabkan oleh pertumbuhan populasi, produksi sampah yang besar, pengelolaan sampah yang tidak memadai, pemanasan global, dan masalah lingkungan global yang semakin serius.

Limbah atau sampah dalam proses penanganannya menghasilkan gas metana dan CO₂. Gas metana mudah terbakar dan harus hati-hati dalam penanganan maupun pengelolaannya. Selain itu, mengolah sampah bisa membantu untuk mengurangi perubahan iklim (SDGs 13) sehingga akan berdampak pada perubahan iklim.

Namun jika sampah yang dikelola secara baik atau dimanfaatkan dapat mendatangkan banyak manfaat, seperti tercapainya SDGs 8 yakni peningkatan ekonomi masyarakat. Pengelolaan sampah secara baik dan menghasilkan nilai ekonomi maka dapat berkontribusi bagi peningkatan perekonomian Masyarakat.

Dalam bab selanjutnya diuraikan secara rinci tentang teknologi pengelolaan limbah padat (Bab 2), teknologi pengolahan limbah cair (Bab 3), serta pemanfaatan limbah sebagai sumber energi alternatif (Bab 4).

1.2 Klasifikasi Limbah Berdasarkan Wujudnya

Limbah dapat dikelompokkan berdasarkan wujudnya, senyawa penyusunnya, dan sumber asalnya. Berdasarkan wujudnya limbah dapat dikelompokkan menjadi limbah berbahaya, limbah gas, limbah padat, dan limbah cair. (Jharia *et al.*, 2019;).



Gambar 1.1. Limbah padat (kiri), limbah cair (tengah) dan limbah gas (kanan) (Google.com)

Limbah yang berbentuk padat biasanya dikenal sebagai sampah, baik itu berupa sampah organik maupun anorganik, seperti, kaleng, kaca, daun-daun layu maupun daun segar yang telah jatuh, sisa makanan, kertas, palstik, kayu, kulit buah, dan lain sebagainya.

Sebenarnya sampah masih memiliki nilai ekonomis jika dibandingkan dengan buangan jenis lainnya. Hal yang dapat dilakukan adalah memanfaatkan kembali atau mendaur ulangnya. Pengolahan lebih lanjut dibutuhkan Ketika sampah tersebut tidak dapat didaur ulang dengan tujuan agar tidak menyebabkan timbulan sampah-sampah yang bisa mencemari lingkungan.

Limbah dengan ciri-ciri bentuk cair (likuid) adalah limbah cair. Untuk lebih rincinya telah didefinisikan oleh pemerintah dalam peraturan pemerintah No. 82 Tahun 2021 bahwa limbah adalah hasil sisa-sisa kegiatan makhluk hidup yang berbentuk cair suatu hasil usaha dan atau kegiatan yang berwujud cair. Bentuk limbah ini dapat berupa cairan yang didalamnya terkandung bahan hasil buangan lainnya dalam wujud campuran (suspense) atau bentuk larutan, serta mengandung air. Biasanya, sumber utamanya berasal dari aktivitas manusia, contohnya kegiatan dalam rumah tangga dan industri, ataupun dari aktivitas alami contohnya aliran air hujan.

Limbah gas merupakan zat buangan dengan wujud gas yang memanfaatkan media berupa udara. Jika pembuangan zat-zat tertentu dari limbah gas ke udara dilakukan terus menerus dan berlebihan maka kadarnya bisa melampaui baku mutu lingkungan sehingga dapat menyebabkan pencemaran dan gangguan pada kesehatan. Biasanya zat pencemar dari limbah gas dapat berupa partikel (butiran halus) maupun gas. Mata telanjang biasanya masih dapat melihat jika berupa partikel, misalnya asap, debu, uap air, kabut, tetapi jika berupa gas biasanya hanya dapat dicium baunya atau dirasakan dampaknya, dan tidak bisa dilihat.

1.3 Klasifikasi Limbah Berdasarkan Senyawa Penyusunnya

Limbah dapat diklasifikasikan berdasarkan senyawa penyusunnya yaitu limbah Bahan Berbahaya dan Beracun atau biasa disingkat limbah B3, limbah anorganik, dan limbah organik. Kandungan senyawa penyusunnya adalah kunci untuk membedakan ragam limbah tanpa memperhatikan wujudnya.



Gambar 1.2. Limbah organik (kiri), limbah anorganik (tengah) dan limbah B3 (kanan) (Google.com)

Buangan yang dihasilkan dari makhluk hidup biasanya bersifat natural dan sangat mudah terurai atau mudah busuk disebut sebagai limbah organik. Contohnya seperti bagian-bagian sisa dari hewan (tulang, kulit, kulit telur), kotoran hewan, dedaunan, sisa makanan manusia ataupun hewan, dan lain sebagainya. Virus dan bakteri biasanya menjadikan zat-zat yang memiliki sifat alami ini sebagai media untuk berkembang dan tumbuh. Zat ini memiliki sifat yang secara alami dapat mempercepat proses pengomposan atau diurai sehingga kembali menjadi tanah.

Bahan-bahan tak hidup seperti plastik, logam, kaca dan bahan-bahan kimia lainnya termasuk produk buangan yang bisa disebut Limbah anorganik. Sifatnya tidak atau sulit diuraikan secara alami dan biasanya agar dapat terurai membutuhkan waktu bertahun-tahun bahkan hingga ribuan tahun. Oleh karena itu, dibutuhkan perlakuan daur ulang pada zat-zat anorganik agar dampak negative terhadap lingkungan dapat dikurangi, seperti menjadikannya sebagai bahan dasar untuk membuat produk baru seperti tas yang terbuat dari pembungkus makanan instan, mendaur ulang plastik menjadi kriya tangan dan menjadi benda inovasi lainnya.

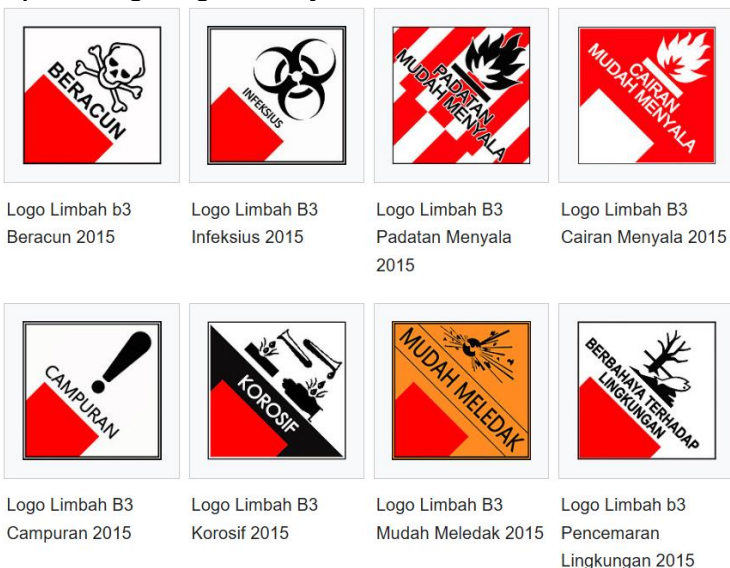
Gabungan zat-zat organik ataupun anorganik yang memiliki sifat racun dan berbahaya bagi kesehatan bagi makhluk hidup merupakan Limbah B3 (bahan berbahaya dan beracun). Umumnya industri besar menjadi sumber dari limbah B3. Contohnya limbah B3 yaitu bahan-bahan kimia, neon, lampu, baterai, sisa pestisida, dan lain sebagainya. Potensi bahaya yang ditimbulkan akan lebih besar dibandingkan jika tidak dikelola dengan baik. Indonesia telah mengatur peraturan terkait LB3 yang terdapat di dalam Permen LHK

Nomor 6 Tahun 2021 tentang Tata Cara dan Persyaratan Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun.

Berdasarkan sumbernya, limbah B3 dibedakan menjadi 3 jenis yaitu:

1. Limbah B3 dari sumber tidak spesifik. Limbah ini berasal dari kegiatan pembersihan alat, pemeliharaan alat, dan lain-lain bukan dari proses primer.
2. Limbah B3 dari sumber spesifik adalah Limbah yang berasal dari kegiatan primer atau kegiatan utama pada sebuah industri.
3. Limbah B3 dari sumber lain, seperti barang pangan yang telah melewati masa kadaluarsa, sisa pembungkus (kemasan), tumpahan, dan buangan bahan yang tidak memenuhi spesifikasi. Limbah ini tergolong dalam jenis limbah yang tidak terduga.

Limbah yang mengandung bahan berbahaya dan beracun biasanya mempunyai sifat-sifat tertentu seperti mudah menyala, bersifat korosif, mudah terjadi oksidasi, mudah meledak dan mudah terbakar, mengandung zat berbahaya (racun), atau menimbulkan gejala-gejala kesehatan seperti mutagenic, karsinogenik, dapat menjadi penyebab iritasi pada kulit, dan lain-lainnya. Gambar 1.3 menampilkan logo-logo untuk jenis limbah B3.



Gambar 1.3. Logo macam-macam limbah B3 (Google.com)

Limbah mudah meledak (*explosive*) adalah limbah yang dapat meledak ketika berada pada suhu dan tekanan standar. Hal ini karena gas dapat dihasilkan dengan suhu dan tekanan tinggi lewat reaksi kimia atau fisik sederhana. Ledakan besar dapat terjadi tanpa diduga-duga pada saat melakukan penanganan, pengangkutan, hingga pembuangan sehingga bisa sangat berbahaya. contoh dari limbah B3 yang memiliki sifat mudah terjadi ledakan yaitu limbah dengan kandungan bahan eksplosif dan limbah dari kegiatan yang dilakukan di laboratorium sejenis asam prikat.

Limbah pengoksidasi (*oxidizing*) adalah limbah yang menimbulkan api karena melepaskan. Hal ini juga disebabkan karena limbah teroksidasi sehingga api dapat muncul saat adanya interaksi dengan bahan lainnya. Limbah ini harus ditangani dengan cepat, tepat, dan serius agar tidak terjadi kebakaran besar pada lingkungan sekitarnya. Contoh limbah B3 yang memiliki sifat oksidasi adalah kaporit.

Limbah yang dengan mudah mengalami kebakaran ketika kontak dengan sumber api, dan udara, atau bahan lainnya meski sudah berada pada suhu dan tekanan standar adalah limbah yang bersifat mudah menyala (*flammable*). Contoh limbah B3 yang mudah menyala misalnya pelarut toluene, pelarut aseton yang asalnya dari industry tinta, pembersih logam, cat, dan laboratorium kimia, terdapat juga pelarur benzena.

Limbah cukup beracun (*moderately toxic*) adalah limbah yang memiliki atau mengandung zat yang bersifat racun bagi manusia maupun hewan, yang penyebarannya dapat melalui kontak langsung dengan kulit, maupun mulut, atau melalui pernapasan yang dapat menyebabkan keracunan, sakit, hingga kematian. Contoh limbah B3 ini adalah limbah pertanian misalnya sisa-sisa buangan pestisida.

Limbah berbahaya (*harmful*) terdiri dari limbah yang berada dalam fase gas, padat maupun cair. Dampak yang ditimbulkan adalah bahaya terhadap kesehatan sampai tingkat tertentu melalui kontak dengan menghirup secara sengaja atau tidak sengaja.

Limbah yang memiliki ciri-ciri dapat membuat kulit iritasi adalah limbah yang bersifat korosif (*corrosive*). Limbah ini, juga bisa menjadi penyebab baja berkarat, memiliki $\text{pH} \geq 2$ (ketika bersifat asam) dan $\text{pH} \geq 12,5$ (saat bersifat basa). Contoh limbah B3 dengan ciri

korosif misalnya, industri baja yang menggunakan asam sulfat pasti menghasilkan limbah berupa sisa-sisa dari asam tersebut, baterai dan accu juga menghasilkan limbah asam, serta penggunaan pembersih yang mengandung sodium hidroksida maka akan dihasilkan limbah tersebut biasanya ada pada industri logam.

Limbah yang menjadi penyebab iritasi adalah limbah iritasi (*irritant*). Limbah ini dapat menimbulkan pusing dan menimbulkan kantuk jika terhirup, perdarahan, iritasi kulit, gangguan pernapasan, penyakit alergi pada kulit, pembengkakan, maupun menyebabkan iritasi saluran pernapasan. Contoh limbah ini adalah pada industri karet menghasilkan limbah asam formiat.

Limbah yang bersifat bahaya bagi lingkungan (*dangerous to the environment*) adalah limbah yang dapat menjadi penyebab bagi rusaknya ekosistem dan lingkungan dan ekosistem, misalnya limbah CFC atau *Chlorofluorocarbon* yang dihasilkan dari mesin pendingin.

Limbah karsinogenik/teratogenik/mutagenik adalah limbah yang dapat memicu timbulnya sel kanker. Teratogenik berarti limbah ini memiliki kemampuan untuk semakin memengaruhi embrio terbentuk, sedangkan limbah mutagenik artinya limbah ini dapat menjadi penyebab kromosom mengalami perubahan-perubahan.

1.4 Klasifikasi Limbah Berdasarkan Sumbernya

Berdasarkan sumbernya limbah dapat dikategorikan menjadi limbah dari rumah tangga, limbah dari industri, limbah dari pertanian, limbah dari elektronik, dan limbah dari medis.

Limbah domestik (rumah tangga) adalah limbah yang berasal dari hasil kegiatan manusia di rumah tangga atau lingkungan sekitarnya. Contoh limbah domestik seperti, kotoran manusia, sisa-sisa makanan, plastik pembungkus makanan, air sisa mencuci baju, air sabun setelah mandi, dan lain sebagainya.

Pengelolaan air limbah domestik seyogyanya dilakukan secara berkelanjutan. Wirawan (2019) menjelaskan bahwa penetapan strategi prioritas dapat dilakukan untuk mengelola air limbah domestik sehingga tujuan program pengembangan pengelolaan air limbah domestik dapat tercapai. Selain itu, dapat juga dilakukan pemilihan teknologi yang tepat, membiayai pengembangan pengolahan limbah,

melakukan penangan permasalahan sosial, merumuskan strategi pengembangan pengelolaan air limbah domestik, serta analisis bagi menurunnya tingkat pencemaran air, pengembangan kelembagaan serta dilakukan peningkatan peran dari masyarakat.



Gambar 1.4. Limbah domestik (kiri atas), limbah industri (tengah atas) dan limbah pertanian (kanan atas), limbah elektronik (kiri bawah), limbah medis (kanan bawah)

Limbah domestik acapkali dapat mencemari sungai sehingga tidak dapat dimanfaatkan untuk kebutuhan sehari-hari. Seperti limbah domestik dari kamar mandi yang dibuang ke sungai atau selokan. Putro dan Prastiwi (2019) melaporkan bahwa air limbah kamar mandi sulit diurai oleh mikroorganisme yang terkandung ddalam air karena limbah tersebut memiliki sifat basa dan banyak mengandung deterjen. Agar dapat dilakukan daur ulang pada limbah domestik dari kamar mandi adalah dengan cara menggunakan teknologi plasma untuk mengolah air limbah dengan memodifikasi trafo flyback dengan frekuensi 7 kHz, 8 KHz dan 10 KHz. Tegangan yang dihasilkan berupa tegangan tinggi (High Voltage) antara 5-24 KV. Dengan demikian menghasilkan penurunan pH air dari 10,0 menjadi 8,1 dan TDS mengalami peningkatan dari 135 ppm menjadi 210 ppm.

Limbah industri berasal dari sisa-sisa proses produksi suatu industri secara besar-besaran, misalnya pada industri teknologi,

industri pangan, industri *fashion* khususnya pakaian lain sebagainya. Limbah yang dihasilkan jenisnya berbeda-beda tergantung pada jenis industrinya, tetapi biasanya pasti mengandung bahan-bahan beracun dan berbahaya.

Kegiatan pertanian biasanya menghasilkan limbah pertanian, seperti sampah organik, pestisida, dan sisa-sisa pupuk. Beberapa produk buangan tertentu seperti pestisida akan dapat menimbulkan masalah kesehatan khususnya bagi makhluk hidup. Terdapat limbah pertanian yang masih bisa dimanfaatkan misalnya jerami padi dan tongkol jagung. Limbah tersebut dapat dijadikan sebagai media tanam jamur merang. Komposisi media tanam jamur merang dengan 5% tongkol jagung dan 95% Jerami memberikan hasil tertinggi pada perlakuan intensitas lama panen dan intensitas panen perhari, serta jumlah tubuh buah (Safitri dan Lestari, 2021).

Tongkol jagung keberadaanya sangat melimpah dan termasuk dalam limbah lignoselulosa sehingga tongkol jagung sangat bermanfaat sebagai tempat tumbuh untuk menanam jamur merang. Penambahan tongkol jagung yang berbeda dengan cara tanam dalam baglog dan keranjang akan dapat berpengaruh terhadap jumlah tubuh buah dan berat tubuh buah jamur merang. Campuran tongkol jagung dan Jerami pada perbandingan 1:1 menghasilkan rata-rata jumlah tubuh buah 12,3 buah dan berat tubuh buah 205,5 g. Jika tanpa jerami menghasilkan rata-rata jumlah tubuh buah 2,2 buah dan berat tubuh buah 37,7 g (Pratiwi, 2017).

Begitu pula limbah pertanian berupa tandan dan kulit pisang dapat dimanfaatkan untuk diekstrak komponen pektinnya. Senyawa tersebut sangat diperlukan sebagai pembentuk gel dalam aplikasinya pada produk pangan baik makanan maupun minuman (Nurhayati *et al.*, 2016).

Limbah elektronik adalah limbah yang dihasilkan dari perangkat elektronik seperti laptop, *handphone*, televisi, komputer, dan lain sebagainya. Kebanyakan Masyarakat dan industri mengabaikan limbah jenis ini padahal mengandung bahan berbahaya seperti merkuri, timbal, dan kadmium.

Limbah medis dihasilkan dari kegiatan medis yang ada dalam rumah sakit, apotek, klinik, laboratorium, dan sejenisnya. Contohnya seperti obat-obatan, bahan kimia, jarum suntik, hingga zat radioaktif.

Pengelolaan limbah ini harus dilakukan dengan baik dan benar agar tidak menimbulkan kontaminasi membahayakan kesehatan makhluk hidup sekitarnya.

1.5 Dampak Paparan Limbah bagi Kesehatan

Limbah udara berbentuk partikel debu atau asap dengan ukuran partikel yang sangat kecil sehingga dengan mata telanjang tidak dapat terlihat. Berbagai penyakit dapat ditimbulkan oleh limbah/polusi udara seperti serangan jantung dan gagal jantung, terganggunya sistem pernapasan, dan stroke. Menurut beberapa penelitian, daerah dengan Tingkat polusi udara tinggi sangat berpotensi terhadap serangan penyakit-penyakit tersebut. Limbah udara juga bisa membahayakan kesehatan janin pada ibu hamil. Salah satu bahayanya adalah gangguan perkembangan otak janin sehingga memungkinkan terjadi peningkatan risiko bayi mengalami ADHD pada hari-hari berikutnya.

Dampak dari limbah bagi penduduk yang tinggal di sekitar lokasi pembuangan sampah adalah hepatitis, terkena diare, kolera, giardiasis, hingga penyakit kanker akibat mengonsumsi air yang sudah tercemar. Pada ibu hamil, tinggal di sekitar tempat pembuangan sampah bisa memicu kelainan pada saat melahirkan bayi seperti bayi lahir dengan berat badan lahir rendah, bahkan cacat lahir.

Air limbah adalah air tercemar yang di dalamnya terdapat kuman maupun bahan kimia. Berbagai macam penyakit dapat timbul akibat air yang sudah terkontaminasi limbah seperti diare yang dapat memicu dehidrasi dan bahkan kematian; jika air minum yang telah terkontaminasi dikonsumsi oleh ibu hamil dapat menyebabkan bayi cacat lahir; penyakit methemoglobinemia atau sindrom bayi biru, dan jika mengonsumsi air yang tercemar nitrat atau mengandung jumlah nitrat tinggi diminum dapat terkena penyakit infeksi, seperti hepatitis, kolera, dan tipes; penyakit ginjal; gangguan fungsi hati; dan kanker.

Hasil penelitian Yuniarti dan Anggraeni (2018) melaporkan bahwa gejala penyakit kulit mulai tampak pada penghuni sekitar TPA yaitu jika lama tinggal antara 3-5 tahun dengan jarak rumah kurang dari 1 km dari TPA. Zahtamal *et al.* (2022) telah membuktikan bahwa

faktor lingkungan berpengaruh terhadap keluhan penyakit kulit yang seperti ketersediaan ventilasi, sumber air minum, saluran pembuangan air limbah (SPAL), dan keberadaan serangga tongket yang cairannya bisa melepuhkan kulit.

Dampak limbah mungkin tidak berdampak langsung bagi kesehatan atau terkadang tidak dapat langsung dirasakan, tetapi hal ini tetap dapat menyebabkan penyakit serius jika tidak segera ditangani. Selain itu, paparannya tidak bisa dianggap sepele karena dapat memicu terjadi penyakit lainnya. Kegiatan yang dapat dilakukan agar dampak berbahaya limbah dapat dihilangkan atau dikurangi adalah mengolah limbah yang dengan tepat dan kesadaran dari dalam diri untuk menjaga kebersihan lingkungan (Daya, 2020).



Gambar 1.5. Leaflet peringatan akan bahaya limbah air bagi kesehatan (Panda, 2023)

DAFTAR PUSTAKA

- Daya, T.A. (2020). Waspada, Kenali Penyakit Akibat Air Limbah. <https://adikatirtadaya.co.id/waspada-kenali-penyakit-akibat-air-limbah/>[Diakses 10 Oktober 2024]
- Jhariya, M. K., Banerjee, A., Meena, R. S., & Yadav, D. K. (Eds.). (2019). *Sustainable agriculture, forest and environmental management*. Springer.
- Nurhayati, N., Maryanto, M., & Tafrikhah, R. (2016). Ekstraksi pektin dari kulit dan tandan pisang dengan variasi suhu dan metode. *Agritech*, 36(3), 327-334.
- Panda. (2023). Penyakit yang Berkaitan dengan Polusi Air di Desa. <https://www.panda.id/penyakit-yang-terkait-dengan-polusi-air-di-desa/>[Diakses 10 Oktober 2024]
- Pratiwi, A. I. (2017). Produktivitas Jamur Merang (*Volvariella volvaceae*) Pada Media Campuran Tongkol Jagung dan Jerami Padi Dengan Cara Penanaman Yang Berbeda (*Doctoral dissertation*, Universitas Muhammadiyah Surakarta).
- Putro, T., & Prastiwi, A. D. (2019). Aplikasi plasma atmosfer pada pH dan TDS air limbah domestik. *Jurnal Aplikasi Pelayaran Dan Kepelabuhanan*, 9(2), 149-152.
- Safitri, S. A., & Lestari, A. (2021). Uji Produktivitas Jamur Merang (*Volvariella volvaceae*) Bibit F4 Asal Cilamaya Dengan Berbagai Konsentrasi Media Tanam Substitusi Tongkol Jagung. *Agrotekma: Jurnal Agroteknologi dan Ilmu Pertanian*, 5(2), 122-131.
- Wirawan, M. (2019). Kajian Kualitatif Pengelolaan Air Limbah Domestik di DKI Jakarta. *Jurnal Riset Jakarta*, 12(2).
- Yuniarti, T., & Anggraeni, T. (2018). Dampak tempat pembuangan akhir sampah putri cempo surakarta terhadap penyakit kulit pada masyarakat Mojosongo. *Infokes: Jurnal Ilmiah Rekam Medis dan Informatika Kesehatan*, 8(1).
- Zahtamal, Z., Restila, R., Restuastuti, T., Anggraini, Y. E., & Yusdiana, Y. (2022). Analisis hubungan sanitasi lingkungan terhadap keluhan penyakit kulit. *Jurnal Kesehatan Lingkungan Indonesia*, 27(1), 9-17.

BAB 2

TEKNOLOGI PENGELOLAAN LIMBAH PADAT

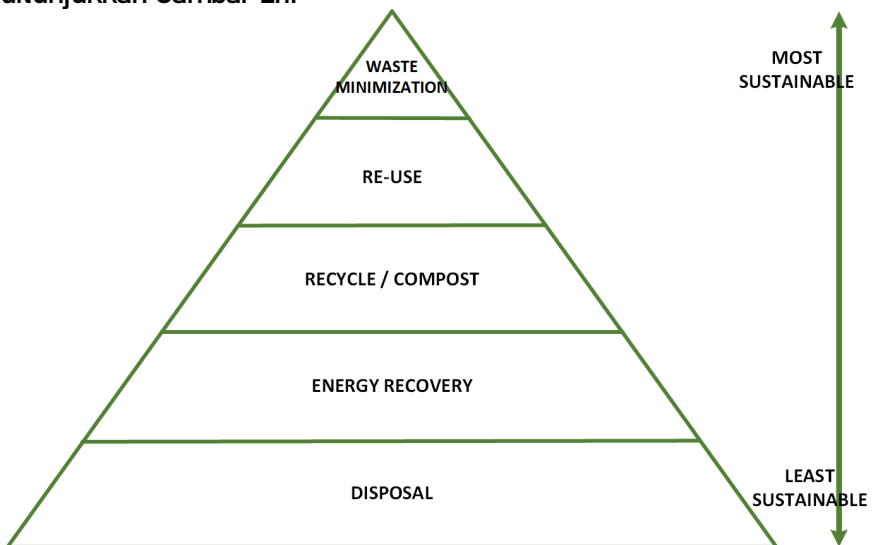
2.1 Pendahuluan

Sampah padat adalah bahan padat yang tidak diinginkan atau tidak berguna yang dihasilkan dari aktivitas manusia di area perumahan, komersial, atau industri atau dapat didefinisikan sebagai bahan yang tidak diinginkan atau dibuang dalam bentuk padat yang dihasilkan dari praktik normal masyarakat dan termasuk sampah makanan, kertas, ataupun kaleng, sapuan jalan, abu, maupun limbah industri lainnya (1).

Sampah atau limbah padat sebagian besar berupa limbah rumah tangga dan terkadang berupa limbah komersial yang dikumpulkan oleh pemerintah kota di suatu wilayah tertentu (2).

2.2 Hierarki Pengelolaan Limbah Padat

Menurut Undang-Undang Eropa, pengelolaan limbah padat dilakukan dengan pendekatan prinsip “hierarki limbah” seperti ditunjukkan Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Hierarki prioritas pengelolaan limbah (Sumber : (3))

Berdasarkan hierarki limbah, pengelolaan limbah disusun berdasarkan urutan prioritasnya dimana pengelolaan yang paling *sustainable* menempati prioritas teratas dan yang paling tidak *sustainable* prioritas paling bawah sebagai berikut (3) :

1. **Minimalisasi limbah** yakni mengurangi jumlah limbah yang dihasilkan oleh seseorang atau masyarakat.
2. **Penggunaan ulang** artinya menggunakan suatu barang lebih dari satu kali. Ini termasuk penggunaan ulang konvensional di mana barang tersebut digunakan lagi untuk fungsi yang sama dan penggunaan ulang fungsi baru misalnya, beton limbah padat dapat dihancurkan dan digunakan sebagai dasar jalan serta bahan inert dapat digunakan sebagai lapisan yang menutupi limbah yang dibuang di tempat pembuangan akhir pada akhir hari.
3. **Daur ulang** berarti memperoleh kembali bahan dari limbah (bahan baku sekunder) dan pemanfaatannya sebagai pengganti bahan baku primer, sedangkan **pengomposan** adalah penguraian biokimia zat-zat organik yang ditemukan dalam sampah.
4. **Teknologi pemulihan energi** adalah pengelolaan limbah yang dapat mengurangi volume limbah dan menghasilkan energi.
5. **Pembuangan limbah** yakni pembuangan bahan yang sudah tidak digunakan secara tepat sesuai dengan pedoman atau undang-undang lingkungan setempat.

Menurut Cheremisinoff (2003), hierarki umum berdasarkan kewajiban atau risiko jangka panjang yang terkait dengan pengelolaan limbah/polusi dan biaya yang terkait adalah sebagai berikut :

1. **Pencegahan** - Strategi ini mencegah terbentuknya limbah sejak awal.
2. **Recycling/Pemulihan Sumber Daya (*Resource Recovery*)/Limbah menjadi Energi (*Waste to Energy*) (R3WE)** - Daur ulang, penggunaan kembali material, pengolahan limbah untuk digunakan kembali, dan konversi jenis limbah tertentu menjadi energi yang berguna seperti panas, listrik, dan air panas adalah strategi untuk memulihkan energi dan mengimbangi biaya untuk pengelolaan limbah secara keseluruhan.

3. **Pengolahan** - Jika limbah tidak dapat dicegah atau diminimalkan melalui penggunaan kembali atau daur ulang, maka kita perlu menerapkan strategi yang bertujuan untuk mengurangi volume dan/atau toksisitas. Teknologi pengolahan adalah proses yang berfokus pada stabilisasi limbah, mengurangi toksisitas, mengurangi volume sebelum pembuangan akhir, atau dapat juga menciptakan produk sampingan dengan penggunaan terbatas.
4. **Pembuangan** - Praktik pembuangan limbah diintegrasikan ke dalam strategi pengelolaan lingkungan dan merupakan bagian integral dari sebagian besar operasi manufaktur serta cukup sering menjadi salah satu komponen biaya langsung tertinggi. Dari sudut pandang bisnis, ini adalah strategi yang paling tidak diinginkan dan dapat langsung ditangani dengan meminimalkan limbah dan praktik Pencegahan Pencemaran (*Pollution Prevention*).

2.3 Teknologi Pengelolaan dan Pengolahan Limbah Padat

Teknologi yang tersedia untuk mengelola serta mengolah atau memproses limbah padat meliputi (3-7) :

1. **Daur Ulang (*Recycling*)**

Salah satu cara pengelolaan limbah padat yang paling berkelanjutan adalah daur ulang. Proses ini tidak berdampak buruk pada kesehatan manusia, kondisi sosial, dan lingkungan. Daur ulang primer digunakan untuk mendaur ulang plastik, dimana sisa plastik dan bagian-bagiannya dimasukkan kembali ke dalam siklus ekstrusi untuk membuat produk seperti plastik. Jenis daur ulang ini hanya boleh dilakukan dengan sisa plastik yang setengah bersih. Sejumlah besar produk kehidupan sehari-hari kita diproduksi dengan cara daur ulang seperti pipa, bingkai pintu, jendela, keranjang belanja, dan tirai.

Ada jenis daur ulang lain yang dikenal sebagai daur ulang kimia. Daur ulang ini dapat dilakukan untuk bahan limbah heterogen dan terkontaminasi yang tidak dapat dipisahkan atau pemisahannya tidak ekonomis. Ini dapat dilakukan dalam daur ulang loop tertutup atau daur ulang loop terbuka berdasarkan produk yang dibuat dari berbagai jenis plastik. Dalam daur ulang loop tertutup,

produk yang sama diproduksi dari bahan asalnya. Produk dapat dibuat seluruhnya dari produk daur ulang atau campurannya contohnya produk kemasan PET. Dalam loop terbuka, plastik daur ulang digunakan untuk produk yang berbeda dari bahan asalnya.

2. Imobilisasi Limbah

Teknik imobilisasi limbah merupakan teknologi terkini yang diusulkan untuk mencegah pergerakan bebas kontaminan dalam limbah dan media di sekitarnya. Imobilisasi dapat bersifat sementara contohnya penahanan atau hampir permanen seperti vitrifikasi.

a. Penahanan (*Containment*)

Penahanan digunakan jika tidak perlu membuang bahan limbah dan/atau jika biaya pembuangannya mahal. Tujuan utama penahanan adalah untuk mencegah atau mengendalikan limbah terkontaminasi cair atau semi-cair agar tidak bocor atau meresap ke area sekitar yang tidak terkontaminasi. Ada beberapa teknik dasar penahanan meliputi pemompaan, penutupan, pengurusan, dan pemasangan dinding lumpur. Pemilihan berbagai jenis sistem penahanan didasarkan pada jenis bahan limbah, dan kondisi geohidrologi lokasi pembuangan limbah. Bahan limbah dapat perlahan terurai secara biologis atau berubah secara kimiawi menjadi bentuk yang tidak beracun atau metode pengolahan baru dapat tersedia untuk mendetoksifikasi limbah. Dengan kata lain, penahanan dapat digunakan untuk "membeli waktu" dalam kondisi darurat.

b. Stabilisasi dan Pematatan

Stabilisasi dan pematatan merupakan dua proses yang terpisah. Stabilisasi mengacu pada teknik yang digunakan untuk membuat limbah menjadi kurang beracun atau kurang berbahaya bagi lingkungan sekitar secara kimiawi. Stabilisasi mengurangi potensi bahaya dari limbah itu sendiri. Contoh teknik stabilisasi meliputi pertukaran ion logam berat dalam matriks alumino-silikat dari agen

stabilisasi semen dan penyerapan logam berat pada abu terbang dalam sistem berair.

Pemadatan digunakan untuk mengubah bentuk fisik limbah menjadi tahan lama dan sesuai sehingga lebih cocok untuk penyimpanan, penimbunan, atau penggunaan kembali. Hal ini dapat dicapai dengan atau tanpa fiksasi kimia. Pemadatan menciptakan penghalang antara komponen limbah dan lingkungan dengan mengurangi permeabilitas limbah, mengurangi luas permukaan efektif yang tersedia untuk difusi, atau keduanya.

Pemadatan nonkimia meliputi pengeringan, pencampuran dengan adsorben, dan stabilisasi vegetatif. Pengeringan meliputi pembuangan air menggunakan pengeringan termal, penyaringan, atau sentrifugasi. Limbah kering biasanya dibiarkan di tempat untuk membangun area TPS atau diangkut ke lokasi TPS yang sesuai.

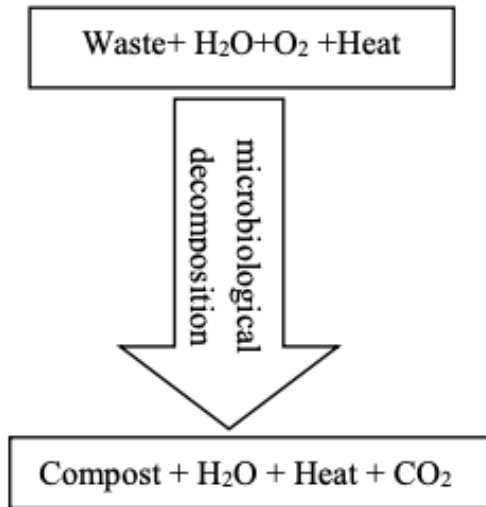
Proses stabilisasi kimia digunakan untuk mengolah limbah industri dan limbah berbahaya. Proses ini merupakan alternatif pembuangan limbah tambang, pembuangan limbah laut, atau penimbunan sampah konvensional. Sebagian besar proses ini berasal dari bidang pengendalian dan pengelolaan limbah radioaktif. Pemadatan dan stabilisasi kimia mengacu pada pengolahan limbah yang menghasilkan efek gabungan dari (6):

- 1) Peningkatan sifat fisik (stabilisasi mekanis),
- 2) Enkapsulasi polutan (imobilisasi dengan fiksasi), dan
- 3) Pengurangan kelarutan dan mobilitas zat beracun (imobilisasi dengan isolasi).

3. Pengomposan (*Composting*)

a. Pengomposan

Pengomposan adalah proses alam dalam mendaur ulang bahan organik yang telah terurai menjadi tanah yang subur yang dikenal sebagai kompos (Gambar 2.2). Proses ini hemat biaya, ramah lingkungan, dan dapat mengurangi jumlah limbah padat yang semakin meningkat dengan ruang yang terbatas.



Gambar 2.2. Proses pengomposan
(Sumber : (3))

Proses pengomposan mengurangi bahan organik karena CO₂, H₂O, dan gas-gas lainnya dilepaskan ke atmosfer. Produk akhir kompos, adalah komposisi mikroorganisme, produk dekomposisi, dan bahan organik yang tidak dapat diurai oleh organisme ini. Proses pengomposan dapat mengurangi jumlah tumpukan kompos 20-60%, kadar air berkurang 40% dan berat berkurang 50%. Nilai pH kompos adalah 7 dan rasio karbon/nitrogen sehingga lebih kecil dari 80 : 1. Dalam kondisi alami, proses dekomposisi dapat berlangsung dari beberapa bulan hingga satu tahun atau bahkan lebih, tergantung pada kondisi iklim.

Faktor-faktor yang penting dalam proses pengomposan meliputi :

- 1) Ukuran partikel bahan organik;
- 2) Aerasi;
- 3) Porositas;
- 4) Kadar air;
- 5) Nilai pH bahan;
- 6) Nutrisi; dan
- 7) Rasio karbon dan nitrogen C/N

Aktivitas mikrobiologi terjadi pada permukaan partikel bahan pengomposan. Pemotongan bahan menjadi lebih kecil akan memperluas permukaan bahan organik dan memungkinkan mikroorganisme menguraikan bahan lebih cepat dan menghasilkan lebih banyak panas. Ukuran partikel yang baik adalah 1,25–4 cm. Dekomposisi aerobik yang cepat hanya terjadi jika terdapat cukup oksigen. Aerasi dicapai dengan memperkaya tumpukan kompos dengan udara segar terutama di bagian yang kekurangan oksigen. Oleh karena itu, pada awal proses, tumpukan kompos harus diaduk secara teratur untuk memenuhi jumlah udara segar terutama di minggu-minggu pertama pengomposan karena kebutuhan oksigen paling besar. Porositas juga mempengaruhi pengomposan. Jika bahan tidak jenuh dengan air, ruang antar partikel sebagian terisi udara yang memasok oksigen bagi mikroorganisme. Jika tumpukan kompos jenuh dengan air akan mengurangi ruang udara dan akan memperlambat proses pengomposan.

Pengomposan pada dasarnya adalah proses aerobik (yaitu, memerlukan oksigen), meskipun aktivitas anaerobik (tanpa oksigen) juga dapat terjadi dalam jumlah yang signifikan. Sebagian besar panas yang dihasilkan dalam pengomposan merupakan hasil dari biodegradasi bahan organik dengan konsumsi oksigen dan produksi karbon dioksida dan air. Jika tidak ada oksigen, kondisi anaerobik terjadi. Hal ini dapat menyebabkan produksi bau dan laju dekomposisi yang melambat (5).

Kadar air 40–60% memberikan kelembaban yang cukup untuk proses aerasi. Jika kadar air di bawah 40%, aktivitas bakteri akan melambat dan di bawah 15–20% bakteri akan hancur total. Apabila kadar air di atas 60%, volume udara berkurang sehingga menimbulkan bau yang tidak sedap dan proses dekomposisi melambat (3). Panas dihasilkan sebagai hasil dari aktivitas mikroorganisme untuk menguraikan bahan organik. Ada hubungan antara suhu dan konsumsi oksigen. Suhu yang lebih tinggi berarti konsumsi oksigen yang lebih besar, sehingga penguraian bahan lebih cepat.

Suhu tumpukan antara 32 dan 60°C, menunjukkan proses pengomposan yang cepat. Suhu di atas 60°C mengurangi aktivitas banyak mikroorganisme. Dengan demikian, kisaran optimal untuk pengomposan adalah 32 dan 60 °C. Suhu tumpukan pengomposan, meningkat menjadi 55–60°C, secara bertahap, dan berlangsung selama berminggu-minggu, kemudian menurun menjadi 38°C atau ke suhu udara sekitar (3).

Pada waktu tertentu, suhu tumpukan sampah organik mencerminkan keseimbangan antara pembentukan panas mikroba dan hilangnya panas ke lingkungan sekitar. Laju pembentukan panas merupakan fungsi dari faktor-faktor seperti suhu, oksigen, air, nutrisi, dan konsentrasi bahan organik yang mudah terurai secara hayati, sedangkan laju hilangnya panas adalah fungsi dari faktor-faktor seperti suhu sekitar, kecepatan angin, serta ukuran dan bentuk tumpukan. Suhu merupakan penentu kuat laju dekomposisi, dimana pada suhu kurang dari 200 °C dekomposisi akan mengalami perlambatan namun di atas 600 °C akan mematikan sebagian besar mikroorganisme yang bertanggung jawab atas dekomposisi. Kisaran suhu yang menguntungkan adalah sekitar 20 hingga 600 °C (atau sekitar 70 hingga 1400 °F) (5).

Nilai pH optimal untuk aktivitas mikroba adalah antara 6,5 dan 7,5. Pelepasan asam organik dapat menurunkan pH secara sementara atau lokal, sehingga keasaman material meningkat. Di sisi lain, produksi amonia dari senyawa nitrogen dapat meningkatkan pH, sehingga alkalinitas material meningkat, namun nilai pH kompos di akhir proses akan menjadi 7 (netral). Karbon dan nitrogen merupakan unsur-unsur penyusun limbah organik, yang dapat dengan mudah mengganggu proses pengomposan jika jumlahnya tidak mencukupi atau berlebihan atau jika rasio C/N tidak tepat. Mikroorganisme menggunakan karbon sebagai sumber energi, dan nitrogen untuk sintesis protein. Rasio kedua unsur ini harus sekitar 30 bagian karbon dan 1 bagian nitrogen, tergantung pada beratnya. Rasio C/N dalam kisaran

25 : 1 hingga 40 : 1 menghasilkan proses yang efisien (3). Aktivitas mikroba juga memerlukan berbagai elemen lain, seperti nitrogen dan fosfor. Pemberian suplemen nitrogen, fosfor, dan kalium pada kompos produk akhir akan meningkatkan kualitasnya dalam hal nutrisi tanaman, namun manfaat ini harus ditimbang dengan biaya penambahan tersebut. (5).

b. *Vermicomposting*

Pengomposan cacing lebih disukai daripada pengomposan mikroba terutama di area yang wilayahnya kecil karena memerlukan lebih sedikit mekanisasi dan mudah dioperasikan. Kompos cacing adalah pupuk organik alami yang dihasilkan dari kotoran cacing tanah yang diberi makan limbah organik yang telah mengalami setengah proses penguraian secara ilmiah. Namun, harus dipastikan bahwa bahan beracun tidak masuk ke dalam rantai yang jika ada dapat membunuh cacing tanah (4).

c. Pemecahan anaerobik (*Anaerobic Digestion / Biofermentation / Biomethanation*)

Biometanasi atau biofermentasi merupakan teknologi yang relatif mapan untuk desinfeksi, penghilang bau, dan stabilisasi lumpur limbah, pupuk kandang, bubur hewan, dan lumpur industri. Biometanasi atau biofermentasi adalah fermentasi dalam wadah dari bagian organik aliran limbah untuk menghasilkan metana (untuk pembangkit listrik) dan sekaligus menstabilkan limbah yang mudah membusuk. Proses ini merupakan metode pra pengolahan dan penstabilan limbah organik atau yang mudah membusuk untuk memperoleh metana. Residu yang dihasilkan dapat dikomposkan secara aerobik, namun hanya sekitar 7 hingga 10% bahan lignoselulosa dalam aliran limbah yang akan terbiodegradasi tanpa proses hidrolisis untuk diubah menjadi gula yang dapat difermentasi (4,5).

Teknologi ini menghasilkan biogas untuk pembangkit listrik dan kompos lumpur sisa. Metode ini memberikan nilai

tambah pada proses aerobik (pengomposan) dan juga menawarkan beberapa keuntungan lain dibandingkan pengomposan biasa dari segi produksi/konsumsi energi, kualitas kompos, dan peningkatan kualitas lingkungan.

Metode ini cocok untuk limbah dapur dan limbah mudah membusuk lainnya, yang mungkin terlalu basah dan kurang berstruktur untuk pengomposan aerobik. Ini adalah proses penghasil energi bersih (100–150 kWh per ton limbah yang dimasukkan). Sistem yang benar-benar tertutup memungkinkan semua gas yang dihasilkan dikumpulkan untuk digunakan.

Namun, metode ini hanya cocok untuk fraksi sampah padat perkotaan yang dapat terurai secara hayati dan organik karena metode ini tidak mendegradasi bahan organik kompleks seperti minyak, lemak, atau bahan lignoselulosa seperti limbah halaman. Seperti halnya dengan pengomposan aerobik, limbah masukan perlu dipisahkan untuk meningkatkan efisiensi proses (hasil biogas) dan kualitas lumpur sisa. Lumpur cair yang dihasilkan dapat digunakan sebagai pupuk organik yang kaya nutrisi, baik secara langsung maupun setelah pengeringan (4).

d. Hidrolisis

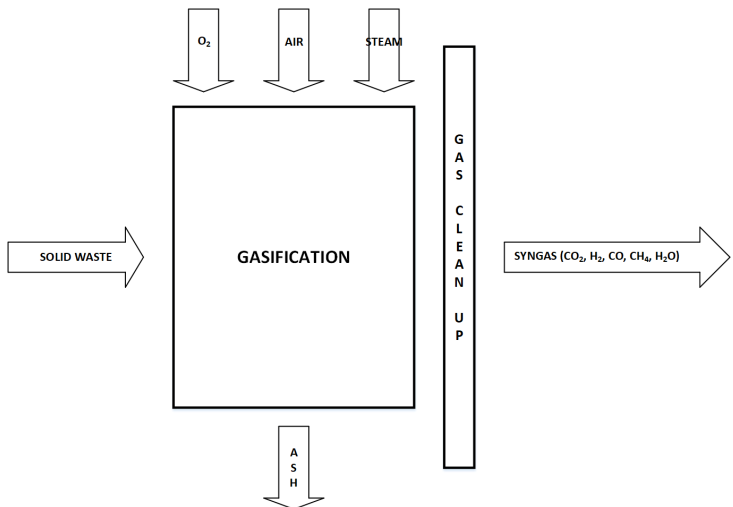
Hidrolisis mengubah kandungan selulosa dari limbah lignoselulosa (kertas dan kayu) menjadi gula yang dapat difermentasi sehingga metana atau etanol dapat diproduksi sebagai bahan bakar alternatif. Hidrolisis konvensional merupakan proses dengan suhu dan tekanan tinggi, dengan adanya asam, untuk memecah bahan selulosa. Hidrolisis enzim (contohnya pada proses alami degradasi dari lantai hutan) dan hidrolisis ledakan uap telah menjadi pengembangan baru dari hidrolisis konvensional, namun, semua proses hidrolisis sangat tergantung pada kontinuitas bahan baku dalam kualitas dan kuantitas, yang membuatnya tidak cocok untuk limbah campuran dan lebih cocok untuk sisa pertanian seperti serbuk gergaji, jerami, atau tanaman yang ditanam secara khusus (5).

4. Waste to Energy by Combustion

a. Gasifikasi

1) Gasifikasi

Gasifikasi didefinisikan sebagai reaksi termal dengan oksigen yang tidak mencukupi untuk mengubah semua hidrokarbon (senyawa karbon, hidrogen, dan molekul oksigen) menjadi CO_2 dan H_2O . Proses ini merupakan proses oksidasi parsial yang menghasilkan gas komposit yang sebagian besar terdiri dari hidrogen (H_2) dan karbon monoksida (CO). Oksidannya dapat berupa udara, oksigen murni, dan/atau uap. Kondisi gasifikasi berada di antara $700 - 1600\text{ }^\circ\text{C}$. Uap disuntikkan ke dalam reaktor gasifikasi untuk menghasilkan CO dan H_2 . Gambar 2.3. menggambarkan proses gasifikasi konvensional yang umum.

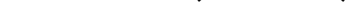
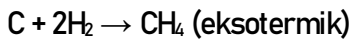


Gambar 2.3. Diagram skematik proses gasifikasi
(Sumber : (3))

Reaksi utama yang terjadi selama proses gasifikasi adalah:

- Oksidasi : $\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$ (eksotermik)
- Reaksi penguapan air : $\text{C} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2$ (endotermik)

- Reaksi pembentukan CH_4 :



Dengan demikian gas CO , H_2 , dan CH_4 merupakan komponen dasar dari proses gasifikasi yang menghasilkan campuran gas (disebut syngas). Nilai kalor syngas umumnya sekitar 4 – 10 MJ/m³. Syngas mentah keluar dari reaktor dan dibersihkan dari partikel yang terbawa dari reaktor seperti sulfur, klorida, atau gas asam. Syngas dikirim ke pembangkit listrik untuk menghasilkan energi, seperti uap dan listrik (3).

2) Gasifikasi Plasma

Gasifikasi plasma merupakan kemajuan yang relatif baru dalam teknologi di mana limbah padat diubah menjadi produk yang mengandung energi. Teknologi ini mampu menyediakan pembuangan berbagai limbah secara berkelanjutan serta menyediakan kebutuhan energi dunia. Berbagai jenis limbah seperti limbah industri dan kota dapat diproses dengan gasifikasi plasma, sehingga dapat mengurangi pencemaran tanah dan air tanah. Pemulihan energi dari bahan baku dapat mencapai 71,8 % (7). Plasma, yang disebut sebagai wujud materi keempat, terdiri dari partikel positif dan negatif yang terbentuk melalui ionisasi partikel gas yang dapat mencapai suhu sangat tinggi. Suhu yang lebih tinggi yang dicapai dalam metode ini memungkinkan untuk memutuskan ikatan dan menguraikan material, sehingga menghasilkan gas sintesis (syngas) yang hampir murni yang sebagian besar terdiri dari H_2 , CO , dan CH_4 (8). Dalam proses penguraian, plasma termal dihasilkan dengan mengalirkan arus listrik tinggi melalui agen gasifikasi. Pada suhu tinggi, elektron terdisosiasi dari molekul agen gasifikasi dan aliran gas/plasma terionisasi diperoleh. Partikel bermuatan yang dihasilkan dalam proses ini membantu menghilangkan dan mendekontaminasi limbah berbahaya. Aliran plasma

memutus semua ikatan kimia bahan baku, sehingga menghasilkan sejumlah radikal, elektron, ion, dan molekul tereksitasi yang sangat aktif dalam reaktor gasifikasi plasma. Proses gasifikasi plasma merupakan proses alotermal di mana plasma digunakan untuk memanaskan dan menstabilkan suhu proses sehingga suhu lebih mudah dikendalikan dibandingkan dengan gasifikasi konvensional. Metode gasifikasi plasma memiliki banyak manfaat, seperti waktu reaksi yang cepat, karena suhu tinggi dan kepadatan energi yang tinggi. Laju alir material yang tinggi dapat dilakukan karena waktu reaksi yang cepat. Tidak terjadi pembakaran di dalam reaktornya, sehingga menghasilkan emisi CO₂ yang lebih rendah, dibandingkan dengan pembakaran limbah (9).

b. Pirolisis

1) Pirolisis

Pirolisis adalah degradasi termal bahan berbasis karbon melalui penggunaan sumber panas eksternal tidak langsung, biasanya pada suhu 450 hingga 750°C, dengan tanpa atau hampir tanpa oksigen bebas untuk menghasilkan arang karbon (residu padat), minyak, dan gas yang mudah terbakar (syngas). Proses ini menghilangkan bagian volatil dari bahan organik dan menghasilkan syngas yang sebagian besar terdiri dari H₂, CO, CO₂, CH₄, dan hidrokarbon kompleks.

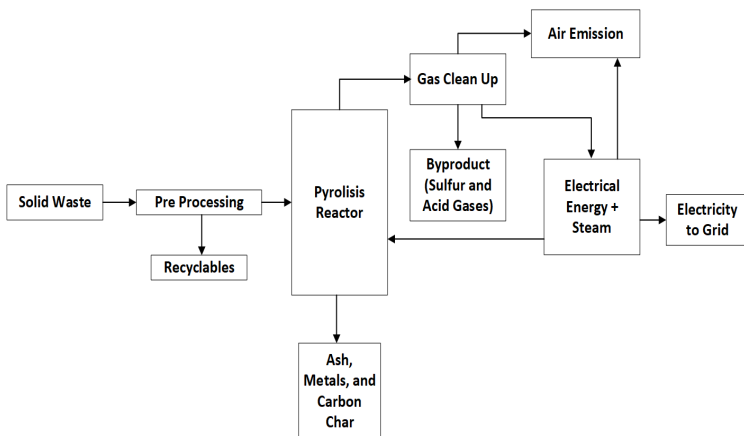
Reaksi yang terjadi pada awalnya adalah reaksi dekomposisi, di mana komponen organik dengan volatilitas rendah diubah menjadi komponen lain yang lebih volatil. Selain itu, pada tahap awal proses pirolisis, reaksi yang terjadi meliputi kondensasi, penghilangan hidrogen dan reaksi pembentukan cincin organik yang mengarah pada pembentukan residu padat dari zat organik dengan volatilitas rendah (persamaan 2.1) :



Jika ada oksigen, CO dan CO₂ akan diproduksi atau interaksi dengan air mungkin terjadi. Kokas yang dihasilkan dapat diuapkan menjadi O₂ dan CO₂.

Proses pirolisis ditunjukkan pada Gambar 2.4. Mayoritas zat organik dalam limbah mengalami pirolisis sebesar 75 – 90% menjadi zat volatil dan sebesar 10–25% menjadi residu padat (kokas/*char*). Langkah pembersihan syngas dirancang untuk menghilangkan partikel yang terbawa dari reaktor, sulfur, klorida/gas asam (seperti asam klorida), dan logam jejak seperti merkuri.

Syngas digunakan dalam pembangkit listrik untuk menghasilkan energi. Syngas/gas sintetis biasanya memiliki nilai energi antara 10 dan 20 MJ/Nm³. Gas sintetis hasil pendinginan dapat dikumpulkan sebagai kondensat untuk digunakan sebagai bahan bakar cair, sedangkan hasil bawah reaktor berupa abu, arang karbon, dan logam.



Gambar 2.4. Diagram skematik proses pirolisis (Sumber : (3))

2) Pirolisis Plasma

Sistem Pirolisis Energi Plasma (*Plasma Energy Pyrolysis System*) adalah proses yang dikembangkan untuk penghancuran limbah berbahaya seperti limbah

radioaktif, dan lainnya (5). Bahan-bahan beracun terbungkus dalam massa kaca, yang relatif lebih aman untuk ditangani daripada abu dari insinerator atau gasifier. Oleh karena itu, proses ini memiliki keunggulan dibandingkan insinerasi dan gasifikasi konvensional. Proses ini menghasilkan bahan bakar gas maupun bahan bakar minyak, yang menggantikan bahan bakar fosil dan dibandingkan dengan pembakaran, polusi atmosfer dapat lebih dikendalikan. Emisi gas NO dan SO tidak terjadi dalam operasi normal karena oksigen yang digunakan terbatas. Kekurangan proses pirolisis plasma yaitu biaya investasi dan energi yang dibutuhkan tinggi, serta pemulihan energi bersih dapat terganggu jika limbah mengandung kadar air dan inert yang berlebihan. Viskositas minyak pirolisis yang dihasilkan relatif tinggi sehingga dapat menjadi masalah dalam pengangkutan dan pembakarannya (4).

c. Insinerasi

Insinerasi adalah proses pembakaran unsur-unsur kimia dalam limbah padat (karbon, hidrogen, sulfur) dalam lingkungan yang kaya oksigen, pada suhu lebih tinggi dari 850°C dan menghasilkan gas-gas hasil pembakaran, terutama CO, CO₂, NO_x, H₂O, SO₂, abu, dan panas (3), sedangkan kandungan anorganik dari limbah diubah menjadi abu. Proses pembakaran ini terkendali untuk memusnahkan limbah padat berbahaya atau mengubahnya menjadi bahan yang kurang berbahaya, kurang besar, atau lebih mudah dikendalikan. Insinerasi dapat digunakan untuk membuang berbagai aliran limbah termasuk sampah perkotaan, limbah komersial, limbah klinis, dan jenis limbah industri tertentu (5).

Metode ini, yang umum digunakan di negara-negara maju, paling cocok untuk limbah bernilai kalori tinggi dengan komponen kertas, plastik, bahan kemasan, limbah patologis, dll. Metode ini dapat mengurangi volume limbah hingga lebih dari 90 persen dan mengubah limbah menjadi bahan yang

tidak berbahaya, dengan pemulihan energi. Metode ini relatif higienis, tidak berisik, dan tidak berbau, serta kebutuhan lahannya minimal. Namun, metode ini sangat tidak cocok untuk pembuangan limbah yang mengandung klorin dan limbah yang mengandung air tinggi atau nilai kalor rendah karena bahan bakar tambahan mungkin diperlukan untuk mempertahankan pembakaran, yang berdampak buruk pada pemulihan energi bersih. Proses insinerasi membutuhkan modal, biaya operasi dan pemeliharaan yang besar sehingga personel yang terampil diperlukan untuk operasi dan pemeliharaan pabrik. Insinerasi juga menghasilkan emisi partikulat, SO_x, NO_x, senyawa terklorinasi di udara, dan logam beracun dalam partikulat yang terkonsentrasi di abu (4).

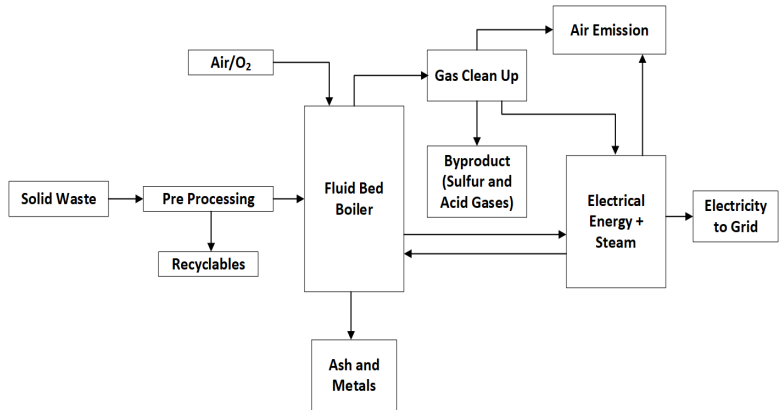
Pada proses insinerasi, uap bertekanan tinggi yang dihasilkan dalam boiler dikirim ke pembangkit listrik untuk pembangkitan energi. Gas buang panas dari boiler dialirkan untuk dibersihkan dan panas yang dihasilkan digunakan untuk pembangkit listrik.

Reaksi dasar utama dalam proses pembakaran limbah padat di insinerator adalah sebagai berikut :



Bila terjadi kekurangan oksigen, reaksinya disebut pembakaran tidak sempurna, di mana CO₂ yang dihasilkan bereaksi dengan C yang belum terpakai dan diubah menjadi CO pada suhu yang lebih tinggi.





Gambar 2.5. Diagram skematik proses insinerasi
(Sumber : (3))

Tujuan dari metode pengolahan termal ini adalah pengurangan volume limbah yang diolah dengan pemanfaatan energi yang terkandung secara simultan. Energi yang diperoleh kembali dapat digunakan untuk pemanasan, produksi uap, maupun produksi energi listrik. Energi bersih yang dapat diproduksi per ton limbah padat mencapai 0,7 MW/jam listrik dan 2 MW/jam pemanasan (3).

Manfaat teknologi insinerasi meliputi :

- a. Pengurangan volume dan berat sampah, terutama sampah padat yang mudah terbakar. Pengurangan ini dapat mencapai 90% dari volume dan 75% dari berat bahan yang seharusnya dibuang ke tempat pembuangan akhir.
- b. Pemusnahan beberapa jenis limbah dan detoksifikasi beberapa jenis limbah lainnya agar lebih sesuai untuk pembuangan akhir, misalnya karsinogen yang mudah terbakar, bahan yang terkontaminasi secara patologis, senyawa organik yang beracun, atau bahan yang aktif secara biologis yang dapat mempengaruhi instalasi pengolahan limbah.
- c. Penghancuran komponen organik dari limbah biodegradable yang, jika dibuang ke tempat pembuangan akhir, secara langsung menghasilkan gas TPS (*Landfill Gas/LFG*).

- d. Pemulihan energi dari limbah organik dengan nilai organik yang cukup.
- e. Penggantian bahan bakar fosil untuk pembangkitan energi dengan konsekuensi menguntungkan pada efek rumah kaca.

Kerugian dari teknologi insinerasi sebagian besar terletak pada pengorbanan lingkungan dari mengubah limbah padat menjadi polusi udara. Ada kekhawatiran nyata atas implikasi insinerasi terhadap lingkungan dan kesehatan masyarakat, terutama karena logam berat dan dioksin dalam emisi insinerator ke atmosfer.

Masalah dan kekhawatiran lain mengenai penggunaan insinerasi sebagai metode pengelolaan limbah diantaranya :

- a. Kebutuhan investasi modal yang tinggi. Insinerasi umumnya memerlukan biaya yang jauh lebih tinggi dan periode pengembalian yang lebih lama daripada pembuangan akhir ke tempat pembuangan sampah.
- b. Tidak ada fleksibilitas dalam pemilihan opsi pembuangan limbah setelah insinerasi dipilih. Karena biaya modal yang tinggi, insinerator harus dikaitkan dengan kontrak pembuangan limbah jangka panjang.
- c. Insinerator dirancang berdasarkan nilai kalor tertentu untuk limbah. Pembuangan bahan-bahan seperti kertas dan plastik untuk didaur ulang dan pemulihan sumber daya mengurangi nilai kalor limbah secara keseluruhan dan akibatnya memengaruhi kinerja insinerator.
- d. Proses pembakaran masih menghasilkan residu limbah padat yang memerlukan pengelolaan dan pembuangan akhir.

Beberapa jenis insinerasi :

- a. Insinerasi Dinding Air (*Waterwall*)
Dalam teknologi ini, sampah perkotaan mentah dibakar langsung di tungku, biasanya tanpa proses pendahuluan untuk penanganan limbah. Produk utamanya adalah uap, yang dapat digunakan langsung atau diubah menjadi listrik, air panas, atau air dingin.
- b. Insinerasi Skala Kecil

Insinerator modular skala kecil menghasilkan pemulihan energi sebagai uap atau air panas. Insinerator ini umumnya tidak memerlukan tahap pemulihan material. Untuk sampah perkotaan, desain sistem umumnya melibatkan tungku individual kecil. Insinerasi skala besar dicapai dengan mengoperasikan beberapa unit atau modul yang identik. Sampah perkotaan biasanya dibakar dalam dua tahap. Pada tahap pertama, sampah perkotaan mentah dibakar dalam lingkungan udara yang terbatas (yaitu, udara yang disuplai tidak mencukupi sehingga terjadi pembakaran yang tidak sempurna). Hal ini mengakibatkan terbentuknya gas yang mudah terbakar dan residu produk sampingan. Gas dari tahap pembakaran pertama atau primer kemudian dibakar dengan bahan bakar tambahan seperti minyak atau gas alam di ruang pembakaran sekunder dengan udara berlebih. Gas panas dari ruang ini dialirkan melalui boiler pemulihan energi (atau penukar panas) untuk menghasilkan uap, air panas, atau udara panas untuk pemanas ruangan. Sistem dua tahap cenderung lebih ekonomis dan memiliki keuntungan dalam mengurangi emisi udara partikulat.

c. Insinerator *Fluid Bed*

Insinerator *fluid bed* terdiri dari lapisan pasir atau material inert serupa yang terkurung dalam sebuah ruang. Lapisan tersebut difluidisasi oleh aliran udara pembakaran primer ke atas. Limbah dimasukkan ke dalam lapisan yang dipanaskan terlebih dahulu, yang selanjutnya disebarkan dan dipanaskan secara efisien hingga mencapai suhu penyalaan campuran. Berbagai macam limbah telah diolah dalam insinerator *fluid-bed*, termasuk sampah perkotaan, lumpur limbah, limbah berbahaya, limbah cair dan gas, dan limbah dengan sifat pembakaran yang sulit.

5. ***Refused Derived Fuels / Pelletization***

Refused Derived Fuel (RDF) merupakan hasil dari pemrosesan sampah padat untuk memisahkan fraksi yang mudah terbakar dari yang tidak mudah terbakar, seperti logam, kaca, dan bara api dalam sampah perkotaan. RDF sebagian besar terdiri dari kertas,

plastik, kayu, dan sampah dapur atau halaman dan memiliki kandungan energi yang lebih tinggi daripada sampah perkotaan yang tidak diolah, biasanya dalam kisaran 12.000 hingga 13.000 kJ/kg. Nilai kalor ini akan bervariasi, tergantung pada program daur ulang kertas dan plastik setempat. Seperti sampah perkotaan, RDF dapat dibakar untuk menghasilkan listrik dan/atau panas. Pemrosesan RDF sering dikombinasikan dengan pemulihan logam, kaca, dan bahan daur ulang lainnya di fasilitas pemulihan sumber daya, sehingga meningkatkan pengembalian investasi dan mengimbangi biaya operasi dan perawatan (5). Pada dasarnya, RDF adalah metode pemrosesan untuk sampah perkotaan campuran, yang dapat sangat efektif dalam menyiapkan umpan bahan bakar yang diperkaya untuk proses termal seperti insinerasi atau tungku industri. Pelet RDF dapat disimpan dan diangkut dengan mudah ke tempat yang jauh dan dapat digunakan sebagai pengganti batu bara dengan harga yang lebih rendah. Karena peletisasi melibatkan operasi pemilahan sampah perkotaan yang signifikan, ini memberikan peluang yang lebih besar untuk menghilangkan bahan-bahan yang berbahaya bagi lingkungan dari limbah yang masuk sebelum pembakaran. Namun, proses ini membutuhkan banyak energi dan tidak cocok untuk sampah perkotaan basah selama musim hujan. Jika pelet RDF terkontaminasi oleh bahan beracun/berbahaya, pelet tersebut tidak aman untuk dibakar di tempat terbuka atau untuk penggunaan rumah tangga (4).

Dua manfaat utama RDF adalah:

- a. RDF dapat dicacah menjadi partikel berukuran seragam atau dipadatkan menjadi briket. Kedua karakteristik ini memudahkan penanganan, pengangkutan, dan pembakaran. RDF juga dapat dibakar bersama bahan bakar lain seperti kayu atau batu bara di fasilitas yang sudah ada. Dengan demikian, RDF berharga sebagai aditif berbiaya rendah, yang dapat mengurangi biaya pembangkitan panas atau listrik dalam berbagai aplikasi.
- b. Lebih sedikit bahan yang tidak mudah terbakar seperti logam berat yang dibakar. Meskipun logam bersifat inert dan tidak mengeluarkan energi saat dibakar, suhu tinggi pada tungku

sampah perkotaan dapat menyebabkan logam menguap sebagian dan mengakibatkan pelepasan asap beracun dan abu terbang. Komposisi RDF lebih seragam daripada sampah perkotaan sehingga memerlukan lebih sedikit kontrol pembakaran dibandingkan pada fasilitas yang membakar sampah perkotaan.

Sebagian besar fasilitas pembakaran RDF menghasilkan listrik dengan biaya modal per ton kapasitas lebih tinggi untuk unit pembakaran RDF dibandingkan dengan unit pembakaran massal dan modular *Waste to Energy*. Terdapat dua jenis utama RDF: RDF kasar (*c-RDF/coarse-RDF*) dan pelet atau briket padat (*d-RDF/densified-RDF*). RDF diproduksi dengan mengolah limbah menjadi RDF kasar atau padat setelah terlebih dahulu membuang bahan-bahan yang tidak mudah terbakar, seperti logam dan kaca.

Biomass-Derived RDF atau RDF yang berasal dari biomassa menggunakan bahan baku mentah seperti kulit kayu, gambut, serpihan kayu, lumpur, kayu industri, dan berbagai jenis limbah yang mudah terbakar, termasuk sampah perkotaan (5).

6. *Landfill*

Penimbunan sampah (*Landfilling*) merupakan pilihan pembuangan sampah tertua namun paling banyak dipraktikkan. Penimbunan sampah telah berkembang dari pembuangan sampah yang tidak terkontrol menjadi pengolahan dan pembuangan yang lebih modern, canggih dengan sistem yang dirancang dan dikelola. Selain itu, lokasi penimbunan sampah modern yang dibangun khusus biasanya menggabungkan sistem untuk ekstraksi gas TPS (yang timbul dari penguraian limbah bioreaktif), yang dapat menghasilkan pemulihan energi. Jenis limbah yang cocok untuk penimbunan sampah meliputi limbah yang dapat terurai secara hayati, limbah berair dalam jumlah terbatas, limbah inert, dan limbah khusus tertentu yang tidak menimbulkan ancaman racun. Limbah yang umumnya dianggap tidak cocok untuk penimbunan sampah (*landfilling*) meliputi cairan atau pelarut yang mudah menguap, limbah yang dapat

menimbulkan kontaminasi dalam lindi, dan limbah yang dapat mengganggu proses biologis di lokasi penimbunan sampah.

Jenis *landfill* ada 2 :

a. *Sanitary Landfill*

Sanitary landfill atau tempat pembuangan sampah (TPS) sanitasi yakni merupakan sarana utama pembuangan semua jenis limbah sisa, limbah perumahan, limbah komersial, limbah institusional, serta limbah padat perkotaan sisa fasilitas pemrosesan limbah dan jenis limbah anorganik dan inert lainnya yang tidak dapat digunakan kembali atau didaur ulang di masa mendatang.

Keuntungan yang dimiliki *sanitary landfill* adalah memerlukan biaya paling rendah untuk pembuangan limbah dan memiliki potensi untuk pemulihan gas dari *landfill* (TPS) sebagai sumber energi. Gas dari *landfill* setelah pembersihan, dapat digunakan untuk pembangkit listrik atau sebagai bahan bakar rumah tangga untuk aplikasi termal langsung. Personel yang sangat terampil tidak diperlukan untuk mengoperasikan *sanitary landfill*.

Keterbatasan utama metode ini adalah biaya transportasi sampah perkotaan yang mahal ke lokasi TPS yang jauh, pencemaran air permukaan oleh limpasan *landfill* jika tidak ada sistem drainase yang tepat, dan akuifer air tanah dapat terkontaminasi oleh lindi yang tercemar jika tidak ada sistem pengumpulan dan pengolahan lindi yang tepat, proses pemulihan gas yang tidak efisien juga dapat mengeluarkan gas rumah kaca yakni karbon dioksida dan metana ke atmosfer, proses ini juga membutuhkan lahan yang luas dan terkadang biaya pengolahan awal untuk meningkatkan kualitas gas dan pengolahan lindi signifikan, memiliki risiko penyalaan/ledakan spontan karena kemungkinan penumpukan konsentrasi metana di udara di dalam TPS jika ventilasi gas yang tepat tidak dibangun.

b. *Landfill Gas Recovery*

Dekomposisi anaerobik limbah padat organik di lingkungan TPS menghasilkan gas TPS (*Landfill Gas/LFG*). LFG sebagian

besar terdiri dari metana dan karbon dioksida, yang keduanya tidak berbau. Konstituen jejak zat volatil lainnya, yang sering kali berbau busuk atau gas beracun, juga ditemukan di LFG. LFG dapat bermigrasi melalui tanah ke dalam bangunan yang terletak di dalam atau dekat TPS. Metana menimbulkan ancaman kebakaran atau ledakan, sehingga LFG harus dikendalikan untuk melindungi properti dan kesehatan serta keselamatan publik.

Gas TPS mengandung sekitar 50% metana. Sisa gas TPS sebagian besar adalah karbon dioksida, nitrogen, oksigen, dan berbagai kontaminan yang dikenal sebagai senyawa organik nonmetana atau (*Non methane organic compound*/NMOC). NMOC biasanya membentuk kurang dari 1% gas TPS. Banyak di antaranya adalah bahan kimia beracun, seperti benzena, toluena, kloroform, vinil klorida, karbon tetraklorida, dan 1,1,1 trikloroetana, dan berbagai jenis senyawa terhalogenasi maupun bahan kimia beracun nonhalogenasi. Ketika bahan kimia terhalogenasi (bahan kimia yang mengandung halogen - biasanya klorin, fluor, atau bromin) dibakar dengan adanya hidrokarbon maka dapat membentuk senyawa yang dioksin dan furan yang sangat beracun dan menimbulkan risiko kesehatan jangka panjang bahkan pada paparan tingkat rendah.

Keuntungan penimbunan sampah (*landfill*) sebagai pilihan pembuangan limbah meliputi :

- 1) Biayanya lebih murah daripada pilihan pembuangan lainnya
- 2) Berbagai macam limbah cocok untuk ditimbun di *landfill*/TPS
- 3) Penimbunan sampah sering kali menjadi satu-satunya rute pembuangan akhir untuk residu yang timbul dari teknologi pengolahan akhir sampah dan pilihan pengelolaan limbah lainnya, seperti insinerasi
- 4) Gas TPS dapat dikumpulkan dan digunakan untuk pemanas dan sebagai bahan bakar rendah polusi untuk pembangkitan energi

- 5) Lahan yang dipulihkan dapat menyediakan ruang yang berharga untuk habitat satwa liar atau penggunaan rekreasi

Kerugian dari penimbunan sampah meliputi :

1. Lokasi yang terdampak lindi dan gas TPS disadari dapat menjadi sumber polusi dengan kebocoran yang tidak terkendali
2. Ada risiko kontaminasi berkelanjutan dari lokasi TPS yang beroperasi
3. Berkurangnya lahan untuk lokasi TPS yang sesuai di dekat sumber timbulan sampah
4. Penimbunan sampah menghasilkan konversi sampah menjadi energi yang lebih rendah dibandingkan strategi pengelolaan sampah padat lainnya
5. Menghambat pengembangan strategi pengelolaan sampah yang inovatif jika terlalu nyaman dengan metode penimbunan sampah
6. Penimbunan sampah dapat menghasilkan lahan terkontaminasi yang tidak sesuai untuk beberapa penggunaan di masa mendatang
7. Penimbunan sampah menyebabkan polusi suara, bau, pemandangan yang tidak sedap, dan sering kali pergerakan kendaraan yang padat menambah masalah polusi udara

2.4 Faktor-Faktor Yang Mengatur Pemilihan Teknologi

Meskipun ada banyak solusi yang mungkin untuk mengelola sampah, namun tidak semua solusi dapat diterapkan. Oleh karena itu, penting untuk menilai kelayakan setiap solusi berdasarkan serangkaian kriteria dan kondisi setempat (10). Kriteria yang digunakan dalam pengelolaan sampah berkelanjutan bersifat fleksibel dan dinamis sesuai dengan situasi dan kondisi sampah di setiap kota. Menurut Loan, et al (10), ada dua belas kriteria manajemen sampah yang mendasar. Kedua belas kriteria tersebut adalah pengembangan teknologi, jenis limbah padat, skala operasi, faktor keberhasilan, produk akhir, investasi modal, biaya operasi, kebutuhan lahan, keterampilan operasi yang dibutuhkan, kemungkinan dampak buruk, dan kontribusi terhadap ketahanan energi dan pangan.

Menurut Asnani (4), keputusan untuk menerapkan teknologi tertentu perlu didasarkan pada kelayakan teknis-ekonomi, keberlanjutan, serta implikasi lingkungannya, dengan mempertimbangkan kondisi setempat serta sumber daya fisik dan keuangan yang tersedia. Faktor-faktor kuncinya adalah :

1. Asal dan kualitas limbah
2. Keberadaan limbah berbahaya atau beracun
3. Ketersediaan tempat pembuangan energi yang dihasilkan
4. Pasar untuk kompos/lumpur hasil pencernaan anaerobik
5. Harga energi/tarif untuk pembelian energi kembali
6. Biaya alternatif, harga tanah, dan biaya modal dan tenaga kerja
7. Kemampuan dan pengalaman penyedia teknologi.

DAFTAR PUSTAKA

- Sen A. Solid Waste Management Issues and Challenges. *Pollut Res.* 2022;41(04):1240–5.
- Ojo AO, Olurin OT, Ganiyu SA, Badmus BS, Idowu OA. An Integrated Geophysical And Geochemical Investigation Of An Open Dumpsite In A Sedimentary Formation. *J Solid Waste Technol Manag.* 2020;46(409–430).
- Golomeova S, Srebrenkoska V, Krsteva S, Spasova S. Solid Waste Treatment Technologies. *Solid Waste Treat Technol.* 2024;67–73.
- Asnani PU. Solid waste management. *India Infrastructure Report.* 2006.
- Cheremisnoff NP. Handbook of solid waste management and waste minimization technologies. *Chemical Engineer.* 2003. 48 p.
- Meegoda JN, Ezeldin AS, Fang HY, Inyang HI. Waste immobilization technologies. *Pract Period Hazardous, Toxic, Radioact Waste Manag.* 2003;7(1):46–58.
- Farooqi ZUR, Kareem A, Rafi F, Ali S. Solid waste, treatment technologies, and environmental sustainability: Solid wastes and their sustainable management practices. *Handb Res Waste Divers Minimization Technol Ind Sect.* 2021;(January):35–57.
- Okati A, Khani MR, Shokri B, Monteiro E, Rouboa A. Numerical modeling of plasma gasification process of polychlorinated biphenyl wastes. *Energy Reports [Internet].* 2021;7(May):270–85. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.07.123>
- Sesotyo PA, Nur M, Suseno JE. Plasma Gasification with Municipal Solid Waste As A Method of Energy Self Sustained for Better Urban Built Environment: Modeling and Simulation. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci.* 2019;396(1).
- Loan NTP, Babel S, Sharp A. Guidelines for Technology Selection for Sustainable Solid Waste Management in Ho Chi Minh City, Vietnam. *Apn-GcrOrg [Internet].* Available from: <https://www.apn-gcr.org/wp-content/uploads/2020/09/b031e31e90070c9d099bc8fa3f6b219a.pdf>

BAB 3

TEKNOLOGI PENGOLAHAN LIMBAH CAIR AMONIA INDUSTRI

Pada Bab ini membahas terkait teknologi penyisihan kadar amonia yang terkandung dalam limbah cair industri khususnya industri pupuk urea dengan menggunakan kolom gelembung pancaran. Inovasi ini menawarkan solusi yang efisien dan efektif untuk mengatasi masalah amonia dalam limbah cair industri khususnya industri pupuk urea, dengan mekanisme yang memanfaatkan proses pelucutan udara (*air stripping*).

3.1 Latar Belakang

Di tengah tantangan global saat ini terkait pencemaran amonia dengan kadar tinggi yang terkandung dalam limbah air industri pupuk urea akan mengakibatkan kerusakan lingkungan air dan menimbulkan ancaman kesehatan bagi manusia dan organisme air. Baku mutu amonia dalam air limbah di Indonesia diatur oleh Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) melalui Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No.5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah Industri Umum, standar ini menetapkan Batasan konsentrasi amonia yang diizinkan dalam air limbah yang dibuang ke lingkungan adalah maksimum 10 mg/L. Amonia dengan kadar tinggi sangat sulit diolah secara biologis dan pertukaran ion (*ion exchange*). Penelitian penyisihan amonia dengan menggunakan *air stripping* pada reaktor *aerocyclone* (Quan, Wang, Zhao, Zhao, & Xiang, 2009) dan reaktor *semi-batch jet loop* (Demergenci, Nuri, & Yildiz, 2012) telah berhasil menurunkan kadar amonia hingga > 95%. Namun kedua alat tersebut dapat mengkonsumsi energi yang sangat besar diakibatkan karena adanya kerja kompresor/alat untuk mengalirkan udara masuk ke dalam reaktor.

Menjawab tantangan ini, hadir suatu inovasi "Kolom Gelembung Pancaran yang dapat menyisihkan kadar amonia yang

terkandung dalam limbah cair industri pupuk urea dengan menggunakan pelucutan udara (*air stripping*). Kolom gelembung pancaran ini, dirancang secara khusus untuk mengurangi kadar amonia secara signifikan, efisien, dan ramah lingkungan. Prinsip kerja kolom gelembung pancaran ini cukup sederhana dengan menggunakan prinsip fisika, untuk menghilangkan amonia dari limbah cair industri dengan cara mengalirkan udara melalui air yang tercemar amonia. Aliran udara yang masuk kedalam kolom diakibatkan oleh tumbukan limbah amonia cair yang keluar dari *nozzle* dengan kecepatan tinggi (*jet*) (Evans & Machniewski, 1999) sehingga tidak membutuhkan kompresor untuk mengalirkan udara masuk ke dalam kolom, selanjutnya sekelompok udara tersebut akan membawa sejumlah amonia keluar dari kolom (Nugroho, Adisalamun, & Machdar, 2014). Kolom gelembung pancaran ini memiliki beberapa keunggulan diantaranya adalah perancangan yang lebih sederhana, pengoperasian dan pemeliharannya kolom yang lebih mudah dan murah, tidak membutuhkan volume kolom yang besar, dan dapat memperoleh efisiensi penyisihan kadar amonia > 90% apabila dibandingkan dengan jenis kolom konvensional lainnya.

3.2 Konsep Teoritis

Teknologi pengelolaan limbah cair amonia industri dengan menggunakan kolom gelembung pancaran (*jet bubble column*) adalah salah satu metode yang efektif dan efisien untuk menghilangkan amonia dari air limbah. Kolom gelembung pancaran menggunakan prinsip perpindahan massa gas-cair yang tinggi, di mana gas (biasanya udara atau gas lain yang mengandung oksigen) dialirkan melalui cairan limbah dalam bentuk gelembung. Berikut adalah konsep teoritis dari teknologi ini:

1. Prinsip kerja kolom gelembung pancaran
 - a. Pengoperasian: Kolom gelembung pancaran adalah reaktor berbentuk silinder vertikal di mana gas dimasukkan dari bagian atas kolom bersamaan dengan cairan. Gas yang masuk diakibatkan karena adanya efek dari cairan yang melewati *ventury ejector* dan cairan yang keluar dari *nozzle* dengan kecepatan *jet* menumbuk cairan yang berada dalam kolom.

Korelasi kedalaman penetrasi gelembung dan *hold up gas* terhadap *nozzle* yang terjadi pada kolom gelembung pancaran (Nugroho, Adisalamun, & Machdar, 2014), mempengaruhi laju udara *entrainment* dan diameter gelembung.

- b. Proses Degradasi Amonia: Amonia dalam limbah akan dihilangkan melalui beberapa mekanisme, seperti *stripping* (penghilangan amonia melalui transfer massa ke fase gas) atau metode pengolahan secara biologis dengan bantuan mikroorganisme tertentu atau tempat pembentukan biofilm dalam *Moving Bed Biofilm Reactor* (MBBR) (Harahap, Zuhra, Yahya, & Lubis, 2022).

2. Mekanisme Penghilangan Amonia

- a. *Stripping* Amonia: Gas yang dilewatkan melalui kolom akan menangkap amonia dari fase cair, terutama jika menggunakan gas inert seperti udara. Efisiensi *stripping* tergantung pada laju alir gas, laju alir cairan, suhu, dan pH (Nugroho, Adisalamun, & Machdar, 2014).
- b. Oksidasi Biologis: Jika kolom gelembung pancaran dilengkapi dengan mikroorganisme atau media pendukung mikroba, amonia dapat dioksidasi menjadi nitrit dan kemudian nitrat melalui proses nitrifikasi. Mikroorganisme seperti *Nitrosomonas* sp. dan *Nitrobacter* sp. berperan dalam proses ini.

3. Faktor-faktor yang Mempengaruhi Efisiensi Proses

- a. Laju Alir Gas: Meningkatkan laju alir gas dapat meningkatkan transfer massa amonia dari cairan ke gas, namun dapat meningkatkan biaya operasi.
- b. Laju Alir Cairan: Meningkatkan laju alir cairan dapat meningkatkan turbulensi di dalam kolom, yang dapat memecahkan gelembung gas menjadi lebih kecil. Gelembung yang lebih kecil meningkatkan luas permukaan kontak antara gas dan cairan, yang dapat meningkatkan transfer massa.
- c. Suhu dan pH: Suhu yang lebih tinggi dapat meningkatkan volatilitas amonia, dan pH yang lebih tinggi (basa) dapat meningkatkan laju *stripping* amonia.

- d. Ketinggian Kolom: Semakin tinggi kolom, semakin lama waktu kontak antara gas dan cairan, yang dapat meningkatkan efisiensi penghilangan amonia.
 - e. Ukuran Gelembung: Gelembung yang lebih kecil memiliki luas permukaan yang lebih besar relative terhadap volumenya, meningkatkan area kontak antara gas dan cairan.
4. Keunggulan Teknologi Kolom Gelembung Pancaran
- a. Efisiensi Tinggi: Mampu mencapai penghilangan amonia yang signifikan dengan desain yang relative sederhana
 - b. Operasi Muda: Tidak memerlukan banyak komponen bergerak, yang membuat perawatan lebih mudah dan biaya operasional lebih rendah
 - c. Fleksibilitas: Dapat dikombinasikan dengan proses biologis, kimia, atau fisik lainnya untuk meningkatkan kinerja pengolahan.
5. Aplikasi dalam Industri
- Teknologi ini sering digunakan pada pengolahan limbah cair industri seperti pupuk, petrokimia, dan pengolahan air limbah domestik yang memiliki kadar amonia tinggi.

3.3 Tujuan Teknologi Pengolahan Limbah Amonia Cair Industri

Adapun tujuan dari inovasi kolom gelembung pancaran ini antara lain:

1. Mengurangi konsentrasi amonia
Menghilangkan atau menurunkan kadar amonia dalam limbah cair industri hingga mencapai tingkat aman sesuai dengan standar baku mutu air limbah industri (< 10 ppm) (Kambuaya, 2014), sehingga mengurangi potensi pencemaran dan kerusakan ekosistem air;
2. Melindungi kesehatan lingkungan dan manusia
Mencegah dampak negative dari paparan amonia yang berlebihan terhadap organisme air dan manusia, seperti keracunan ikan dan masalah kesehatan lainnya yang disebabkan oleh air yang terkontaminasi;

3. Meningkatkan efisiensi pengolahan limbah
Memperkenalkan suatu metode pengolahan limbah industri yang lebih efisien, dan ekonomis, yang mampu memproses volume limbah dengan kapasitas besar dengan biaya operasional yang rendah;
4. Mendukung keberlanjutan dan kepatuhan regulasi
Membantu industri untuk memenuhi peraturan dan standar lingkungan yang ketat terkait pembuangan limbah cair, serta mendukung inisiatif keberlanjutan yang lebih luas dalam operasi industri;
5. Mengurangi penggunaan bahan kimia berbahaya;
Meminimalisir penggunaan bahan kimia tambahan dalam proses pengolahan limbah, dengan memanfaatkan pendekatan fisika dan teknologi ramah lingkungan;
6. Memfasilitasi *reuse* dan *recycling* air
Meningkatkan kualitas air buang sehingga dapat dipertimbangkan untuk digunakan kembali (*reuse*) atau didaur ulang (*recycling*) dalam proses industri, mengurangi kebutuhan penggunaan air bersih dan menjaga sumber daya air;
7. Memfasilitasi *reuse* dan *recycling* gas amonia
Meningkatkan kualitas gas amonia yang telah diproses didalam kolom gelembung pancaran untuk digunakan kembali (*reuse*) menjadi bahan baku atau didaur ulang (*recycling*) dalam suatu proses industri untuk menjadi produk lain yang memiliki nilai tambah;
8. Meningkatkan citra dan tanggung jawab sosial
Bagi perusahaan, dapat memperkuat reputasi Perusahaan di mata public dan pemangku kepentingan lainnya dengan menunjukkan komitmen terhadap pengelolaan lingkungan yang bertanggung jawab dan berkelanjutan.

3.4 Manfaat Kolom Penyisihan Limbah Amonia

Manfaat inovasi kolom gelembung pancaran untuk menyisihkan kadar amonia yang terkandung dalam limbah cair industri pupuk urea dapat dirincikan berdasarkan kepentingan

masing-masing pemangku kepentingan, yaitu industri, pemerintah, dan perguruan tinggi:

1. Bagi industri:

- a. Inovasi ini membantu industri memenuhi peraturan lingkungan terkait pengolahan limbah, menghindari sanksi hukum;
- b. Efisiensi dalam penyisihan amonia dapat mengurangi biaya pengolahan limbah jangka panjang, seperti biaya untuk bahan kimia, perawatan fasilitas, dan energi;
- c. Penggunaan teknologi ramah lingkungan meningkatkan citra Perusahaan sebagai entitas yang bertanggung jawab terhadap lingkungan, menarik pelanggan yang peduli lingkungan, dan memperkuat hubungan dengan pemangku kepentingan;
- d. Dengan kualitas air buangan yang lebih baik, industri dapat menggunakan kembali air dalam proses produksi, yang mengurangi biaya untuk air bersih dan meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya;
- e. Memastikan operasi bisnis yang berkelanjutan dengan mengurangi dampak lingkungan, yang penting untuk pertumbuhan jangka panjang dan kelangsungan usaha.

2. Bagi pemerintah

- a. Teknologi ini membantu pemerintah dalam upaya mengurangi pencemaran air akibat limbah industri, mendukung program pelestarian lingkungan, dan melindungi ekosistem perairan;
- b. Dengan mengurangi kadar amonia dalam air limbah, teknologi ini membantu melindungi Kesehatan Masyarakat dari dampak negative air yang terkontaminasi, seperti penyakit kulit, gangguan pernapasan atau keracunan;
- c. Membantu pemerintah memastikan bahwa industri mematuhi standar dan peraturan lingkungan yang ditetapkan, sehingga memudahkan pemantauan dan penegakan hukum;
- d. Mengurangi biaya yang harus ditanggung oleh pemerintah untuk membersihkan dan memperbaiki kerusakan lingkungan akibat pencemaran, serta biaya perawatan kesehatan yang meningkat akibat kualitas air yang buruk;

- e. Inovasi ini mendukung tujuan dan agenda berkelanjutan nasional dan internasional, seperti pencapaian *Sustainable Development Goals* (SDGs), khususnya yang berkaitan dengan air bersih dan sanitasi.
3. Bagi Perguruan Tinggi
- a. Menjadi objek studi untuk penelitian lebih lanjut, membuka kolaborasi dengan industri dan pemerintah dalam pengembangan teknologi pengolahan limbah yang efektif dan efisien;
 - b. Menyediakan bahan ajar yang relevan dan aplikasi nyata untuk mengedukasi mahasiswa, serta mengembangkan kapasitas riset inovasi;
 - c. Mendorong pembentukan pusat inkubasi teknologi dan *start-up* berbasis lingkungan yang berfokus pada pengembangan solusi berkelanjutan untuk pengolahan limbah dan teknologi hijau;

Berperan dalam pengembangan solusi nyata yang memberikan manfaat bagi masyarakat luas, memperkuat peran perguruan tinggi sebagai pusat inovasi dan solusi masalah lingkungan.

3.5 Keunikan Kolom Gelembung Pancaran Untuk Menyisihkan Limbah Amonia Cair

Keunikan kolom gelembung pancaran dalam menyisihkan kadar amonia yang terkandung dalam limbah cair industri pupuk urea ini, meliputi beberapa aspek berikut:

1. Desain modular dan fleksibel
Kolom ini dirancang modular, sehingga dapat dengan mudah disesuaikan atau diperluas sesuai dengan kebutuhan kapasitas industri. Desain yang fleksibel memungkinkan penerapan dalam berbagai jenis industri, dari skala kecil hingga besar, dan dapat diadaptasi dengan mudah tanpa perubahan besar pada infrastruktur yang ada.

2. Efisiensi tinggi dengan konsumsi energi rendah
Sistem ini dirancang untuk menggunakan energi yang lebih efisien, dengan konsumsi daya yang lebih rendah untuk aerasi dan sirkulasi dibandingkan teknologi konvensional. Efisiensi ini dicapai melalui optimalisasi desain kolom, pengaturan aliran limbah, pengaturan aliran udara yang tidak membutuhkan kompresor.
3. Peningkatan kualitas air untuk *reuse* dan *recycling*
Menghasilkan air buang dengan kualitas yang lebih baik, yang dapat dipertimbangkan untuk digunakan kembali (*reuse*) dalam proses industri lainnya atau diolah lebih lanjut untuk didaur ulang (*recycling*), sehingga mengurangi kebutuhan air bersih dan menghemat sumber daya.
4. Desain anti-korosi dan tahan bahan kimia
Kolom ini dibuat dengan bahan yang tahan terhadap korosi dan bahan kimia agresif, menjadikannya lebih awet dan tahan lama, serta meminimalkan biaya pemeliharaan dan penggantian komponen.
5. Ramah lingkungan dan berkelanjutan
Inovasi ini mengurangi penggunaan bahan kimia berbahaya dan meminimalkan dampak lingkungan, sambil tetap mempertahankan tingkat penyisihan amonia yang tinggi. Teknologi ini juga dirancang untuk mengurangi emisi gas rumah kaca terkait pengolahan limbah.
6. Mampu menangani beragam karakteristik limbah
Kolom ini dapat menangani berbagai karakteristik limbah cair dengan konsentrasi amonia yang berbeda, serta dapat mengadaptasi proses penyisihan berdasarkan variabilitas kualitas limbah, seperti perubahan suhu, dan pH.
7. Integrasi dengan teknologi lain
Dapat diintegrasikan dengan teknologi pengolahan limbah lainnya, seperti sistem pengolahan biologis tambahan atau unit filtrasi tersier, untuk memberikan solusi pengolahan yang lebih komprehensif dan sesuai dengan kebutuhan spesifik.

3.6 Perhitungan Koefisien Perpindahan Massa ($K_L a$) dan Efisiensi Penyisihan Amonia

Perhitungan koefisien perpindahan massa dan efisiensi penyisihan amonia yang terjadi di dalam kolom gelembung pancaran (*jet bubble column*) melibatkan penggunaan prinsip-prinsip perpindahan massa, parameter operasi kolom, dan data eksperimen. Berikut ini adalah perhitungan sederhana koefisien perpindahan massa yang diturunkan dari perhitungan persamaan neraca massa amonia keseluruhan yang terjadi di dalam reaktor gelembung pancaran dan perhitungan efisiensi penyisihan amonia (Nugroho & Hasan, 2024):

1. Menghitung koefisien perpindahan massa ($K_L a$):

$$-\ln\left(\frac{C_t}{C_0}\right) = K_L a \cdot t \quad \dots \text{Pers(1)}$$

Pers(1) diatas dapat kita sederhanakan dalam bentuk persamaan garis lurus berikut:

$$y = ax \quad \dots \text{Pers(2)}$$

dimana:

$$y = -\ln\left(\frac{C_t}{C_0}\right), \quad a = K_L a, \quad \text{dan} \quad x = t$$

2. Menghitung efisiensi penyisihan amonia:

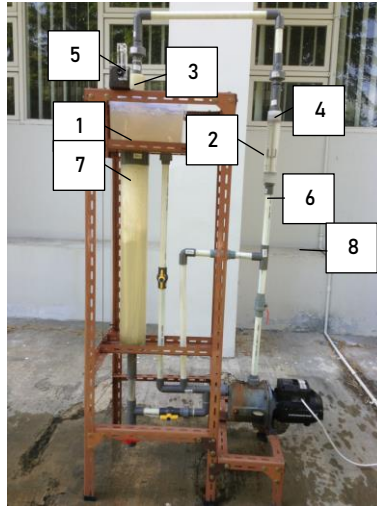
$$\text{Efisiensi}(\%) = \frac{C_t - C_0}{C_0} \quad \dots \text{Pers(3)}$$

Dimana :

- C_0 : Konsentrasi amonia awal yang terkandung dalam limbah cair pupuk urea (mg/L)
- C_t : Konsentrasi amonia dalam limbah cair pupuk urea pada saat t dalam fase cair (mg/L)
- $K_L a$: koefisien perpindahan massa (menit⁻¹)
- t : waktu *stripping* (menit)

3.7 Spesifikasi Kolom Gelembung Pancaran

Berikut adalah gambar dan spesifikasi teknis kolom gelembung pancaran:



Gambar 3.6. Kolom Gelembung Pancaran

Tabel 3.3. Spesifikasi teknis kolom gelembung pancaran

No	Nama Bagian	Spesifikasi	Fungsi
1	Kolom	- Berbahan: Acrylic - Kapasitas: 12 L	Sebagai tempat terjadinya proses penyisihan kadar amonia
2	Pipa	Ukuran: 0.5 <i>inchi</i>	Untuk mengalirkan limbah cair ke kolom
3	Kepala <i>nozzle</i> (<i>Venturi injector</i>)	-Berbahan: logam - Ukuran: 0,5 <i>inchi</i>	Untuk mengalirkan limbah cair dengan kecepatan tinggi dan menarik udara masuk ke kolom
4	<i>Flowmeter</i> cairan	Kapasitas: 0 – 50 LPM	Untuk mengukur laju alir cairan
5	<i>Flowmeter</i> gas	Kapasitas:	Untuk mengukur

No	Nama Bagian	Spesifikasi	Fungsi
		0 - 20 LPM	laju alir udara
6	<i>Valve</i>	Ukuran: 0,5 <i>inchi</i>	Untuk mengatur laju alir limbah
7	Pipa <i>downcomer</i>	Ukuran: 0.5 <i>inchi</i>	Untuk tempat tumbukan antara limbah cair dengan udara
8	Pompa	Tegangan listrik: 220-240V Konsumsi Listrik 500 watt Kapasitas max: 83 LPM	Untuk mengalirkan limbah cair dari tangka penampung ke dalam kolom

3.8 Bahan Baku Pengolahan Limbah Amonia Cair

Bahan yang digunakan dalam proses pengolahan limbah amonia cair industri pupuk urea, diantaranya:

1. Limbah cair amonia: Limbah ini digunakan sebagai bahan baku utama yang akan diproses. Limbah cair ini dimasukkan ke dalam kolom gelembung pancaran untuk dikontakkan dengan udara sebagai gas pembawa sehingga amonia dapat dihilangkan.
2. Udara: berfungsi sebagai medium pembawa yang akan menangkap amonia dari larutan limbah. Udara tersebut diinjeksikan ke dalam kolom gelembung melalui *nozzle* yang menciptakan gelembung-gelembung kecil, meningkatkan area kontak dengan limbah cair dan mempercepat transfer amonia ke fasa gas.
3. *Aquadest* atau air demin: digunakan sebagai pelarut dalam berbagai tahap pengolahan limbah amonia cair, seperti pembilasan sistem, dan pengenceran larutan NaOH. Selain itu juga aquadest atau air demin dapat meminimalkan gangguan pada sistem dan memastikan bahwa proses berjalan dengan optimal tanpa kontaminasi tambahan.
4. Larutan soda kaustik (NaOH): Merupakan bahan kimia tambahan (opsional) yang dapat digunakan untuk menyesuaikan pH limbah

cair sebelum masuk ke dalam kolom jika diperlukan. Namun, ini biasanya hanya dilakukan jika ada kebutuhan spesifik untuk meningkatkan efisiensi penghilangan amonia.

5. Reagen *Nessler* ($\text{HgCl}_2\text{-KI-KOH}$) *spectrophotometry*. digunakan untuk mendeteksi dan mengukur konsentrasi amonia dalam sampel air, seperti limbah cair.

3.9 Proses Pelaksanaan Teknologi Pengolahan Limbah Amonia Cair

Proses pelaksanaan peyisihan kadar amonia yang terkandung dalam limbah cair industri terbagi menjadi:

1. Persiapan bahan experiment

Mempersiapkan bahan percobaan berupa limbah cair amonia yang diperoleh dari industri pupuk urea

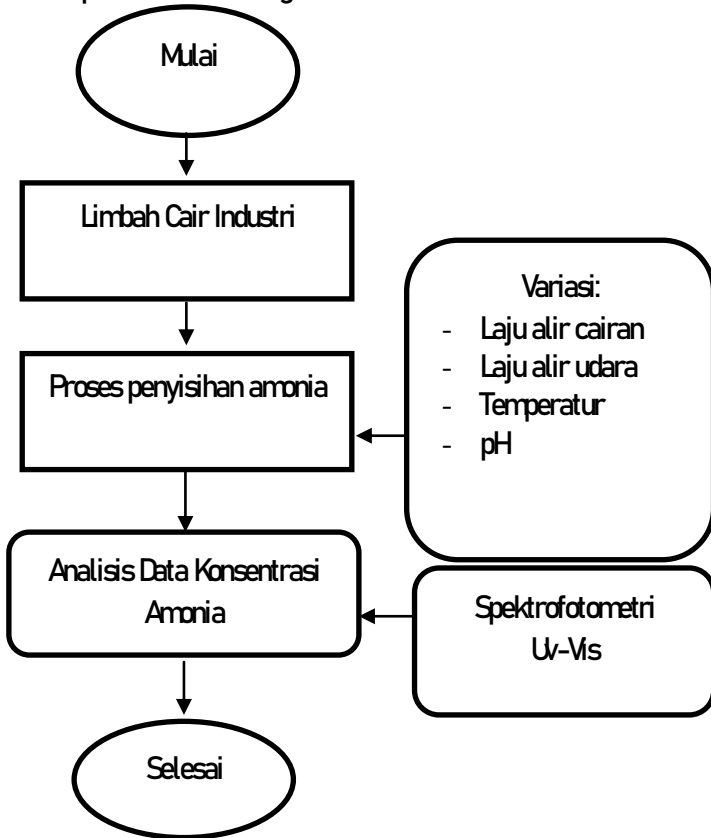
2. Proses penyisihan amonia

Pada proses penyisihan kadar amonia, dilakukan analisis kadar amonia dalam sampel limbah sebelum limbah di *treatment* dalam kolom semi *batch*. Selanjutnya limbah cair disirkulasi dengan menggunakan pompa masuk kedalam kolom secara *loop* tertutup dan udara yang masuk kedalam kolom dialirkan secara kontinyu. Pada proses ini, dilakukan variasi berupa laju alir limbah, laju alir udara, temperature dan pH. Selama proses penyisihan amonia, setiap 15 menit sampel diambil dari kolom dan dianalisa. Amonia yang keluar dari kolom di tampung dalam tabung gas dan selanjutnya bisa digunakan kembali sebagai bahan baku untuk diproses menjadi produk lain yang memiliki nilai tambah.

3. Analisis data konsentrasi amonia

Data sampel yang diambil sebelum *treatment* dan selama proses, diukur perubahan konsentrasi amonia yang terkandung dalam air limbah menggunakan alat *spektrofotometri Uv-Vis*.

Proses penyisihan kadar amonia dapat digambarkan melalui diagram alir percobaan sebagai berikut ini:



Gambar 3.7. Diagram alir penyisihan kadar amonia yang terkandung dalam limbah cair industry

3.10 Hasil dan Pengolahan Data Penyisihan Amonia

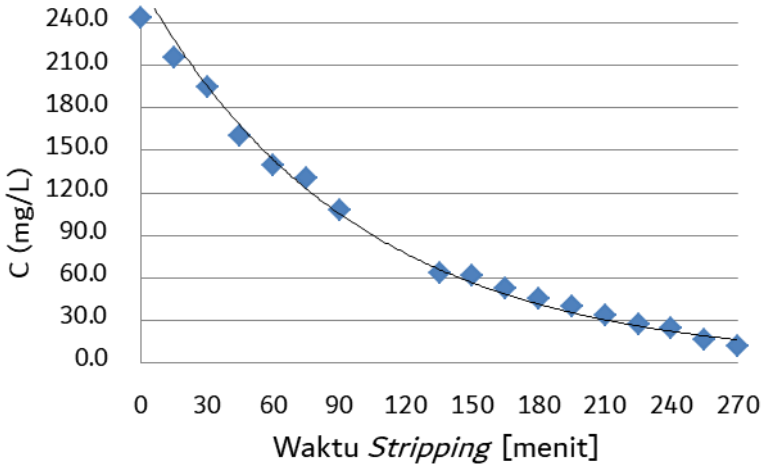
Data hasil penelitian konsentrasi penyisihan kadar amonia yang terkandung dalam limbah cair industri pupuk dengan menggunakan kolom gelembung pancaran pada kondisi operasi: laju alir cairan 40 L/menit, Laju alir udara 10,5 L/menit, Temperatur 30°C, dan pH 11,75, disajikan dalam bentuk Tabel 3.2 berikut ini:

Tabel 3.4. Data hasil penyisihan konsentrasi amonia terhadap waktu

No	t (menit) (x)	C (mg/L)	$-\ln = (C_i/C_0)$ (y)	% Efisiensi
1	0	243,6	0,000	0,00
2	15	215,8	0,121	11,38
3	30	195,1	0,222	19,88
4	45	160,4	0,418	34,15
5	60	139,3	0,559	42,80
6	75	130,2	0,626	46,54
7	90	108,1	0,812	55,62
8	135	63,5	1,344	73,92
9	150	61,8	1,372	74,64
10	165	52,6	1,532	78,39
11	180	45,3	1,683	81,41
12	195	39,7	1,815	83,72
13	210	33,7	1,978	86,17
14	225	27,4	2,186	88,76
15	240	24,6	2,294	89,91
16	255	16,8	2,671	93,08
17	270	11,9	3,016	95,10

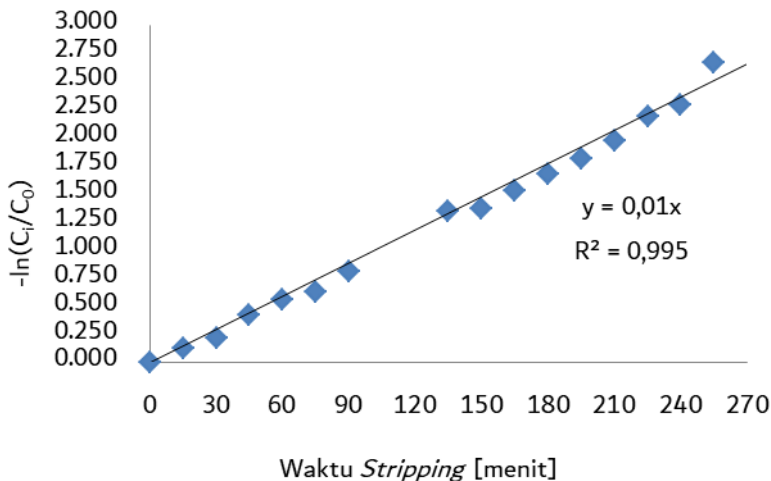
Dari Tabel 3.2. Kita dapat melihat bahwa konsentrasi amonia berkurang secara signifikan, sedangkan nilai $-\ln = (C_i/C_0)$ dan efisiensi penyisihan amonia meningkat seiring berjalannya waktu pengolahan yang dilakukan dengan cara pelucutan udara (*air stripping*). Untuk memperoleh nilai koefisien perpindahan massa ($K_L a$), kita dapat lakukan dengan cara membuat grafik dari data antara laju perubahan $-\ln = (C_i/C_0)$ terhadap waktu (t), yang diperoleh dari Tabel 3.2. Gambar 3.3 merupakan grafik hubungan antara waktu *stripping* (menit) dengan konsentrasi amonia (mg/L). Grafik ini memperlihatkan penurunan konsentrasi amonia secara eksponensial seiring dengan waktu *stripping*. Pada awal proses, konsentrasi amonia menurun dengan cepat, kemudian laju penurunan mulai melambat setelah sekitar 150 menit. Pada waktu awal (0-60 menit), terdapat penurunan tajam dari sekitar 240 mg/L menjadi sekitar 140 mg/L. Ini menunjukkan bahwa pada awal proses, sistem *stripping* sangat efektif

dalam menghilangkan amonia dari air limbah. Setelah waktu tersebut, penurunan konsentrasi menjadi lambat, dan pada akhir waktu *stripping* (270 menit), konsentrasi amonia mendekati 12 mg/L. Efisiensi *stripping* lebih tinggi pada awal proses, di mana konsentrasi amonia yang tinggi membuat proses lebih efisien. Seiring waktu dan berkurangnya konsentrasi amonia, efisiensi penghilangan amonia menurun.



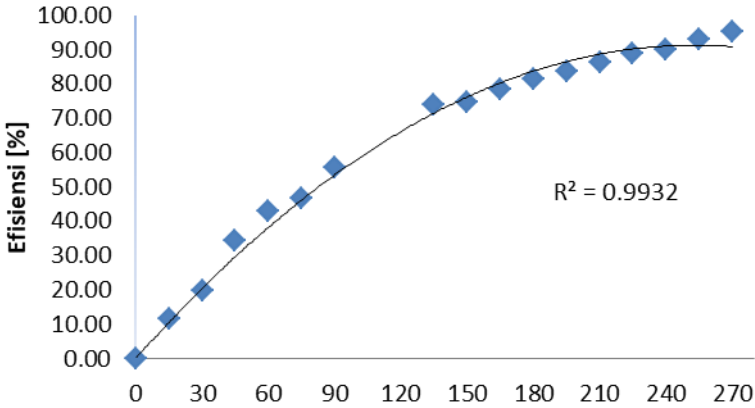
Gambar 3.8. Grafik laju perubahan konsentrasi amonia terhadap waktu *stripping*

Gambar 3.3, merupakan grafik yang menunjukkan hubungan linear antara waktu *stripping* dan laju perubahan $-\ln = (C_i/C_0)$, yang mengidentifikasi bahwa proses penyisihan amonia mengikuti model kinetika orde pertama. Pada model ini, laju penyisihan amonia sebanding dengan konsentrasi amonia tersisa. Persamaan garis regresi yang ditunjukkan adalah $y = 0,01 x$, yang berarti bahwa laju perubahan $-\ln = (C_i/C_0)$ terhadap waktu adalah sekitar 0,01 per menit. Ini mengidentifikasi laju pengurangan amonia dalam air limbah per satuan waktu (menit).



Gambar 3.9. Grafik laju perubahan $-\ln = (C_i/C_0)$ terhadap waktu *stripping*

Pada Gambar 3.4 diperoleh nilai $R^2 = 0,995$ menunjukkan bahwa data tingkat kesesuaian yang sangat tinggi dengan regresi. Nilai R^2 mendekati 1 ini berarti bahwa sekitar 99,5% variasi dalam $-\ln = (C_i/C_0)$ dijelaskan oleh variable waktu *stripping*, mengidentifikasi keakuratan model dalam menjelaskan fenomena penyisihan amonia. Secara keseluruhan, grafik ini menunjukkan bahwa proses *stripping* amonia berlangsung secara konsisten dengan laju yang tetap, mengikuti kinetika orde pertama dengan korelasi yang sangat tinggi antara waktu *stripping* dan penurunan konsentrasi amonia.



Gambar 3.10. Pengaruh waktu *stripping* terhadap efisiensi amonia

Gambar 3.5, merupakan grafik yang menggambarkan antara waktu *stripping* (menit) dan efisiensi penyisihan amonia (%). Efisiensi penyisihan amonia meningkat secara signifikan pada awal proses *stripping*, yang ditunjukkan oleh kurva yang semakin naik tajam pada fase awal (0-100 menit). Setelah mencapai sekitar 150-200 menit, peningkatan efisiensi melambat dan mulai mendekati kondisi jenuh, dengan nilai efisiensi yang hampir mendekati 96%. Ini menunjukkan bahwa proses mulai mendekati kapasitas maksimumnya dalam menghilangkan amonia. Kurva ini menggambarkan hubungan non-linear antara waktu *stripping* dan efisiensi, yang diharapkan dalam banyak proses penyisihan seperti ini. Nilai $R^2 = 0,9941$ menunjukkan hubungan yang sangat kuat antara waktu *stripping* dan efisiensi. Ini berarti model yang digunakan untuk menggambarkan data ini sesuai dengan data yang diamati hampir secara sempurna, di mana sekitar 99,41% variasi efisiensi dapat dijelaskan oleh variable waktu *stripping*. Dari grafik ini, terlihat bahwa efisiensi penyisihan mencapai tingkat yang sangat tinggi (>90%) sekitar 200 menit. Ini dapat digunakan sebagai acuan untuk menentukan waktu operasi yang optimal dalam proses *stripping* untuk mencapai efisiensi maksimum tanpa membuang energi atau waktu secara berlebihan.

3.11 Prospek Inovasi Kolom Gelembung Pancaran

Inovasi kolom gelembung pancaran (*jet bubble column*) merupakan salah satu teknologi yang prospektif untuk menyisahkan kadar amonia dalam limbah cair industri pupuk urea. Kolom ini bekerja dengan prinsip pelucutan udara (*air stripping*) yang dapat membentuk gelembung yang halus seperti awan, sehingga meningkatkan luas permukaan kontak antara udara dan alir limbah. Berikut adalah beberapa prospek dari inovasi ini:

1. Peningkatan efisiensi dan efektifitas penyisihan amonia: Kolom gelembung pancaran memiliki kemampuan yang sangat baik dalam transfer massa, yang memungkinkan amonia di dalam limbah cair berpindah dengan cepat ke fasa gas. Hal ini disebabkan oleh ukuran gelembung yang kecil dan distribusi gelembung yang merata, sehingga meningkatkan efisiensi penghilangan amonia.
2. Operasi Sederhana dan Pemeliharaan Rendah: Teknologi kolom gelembung pancaran relative sederhana dalam desain dan operasionalnya. Sistem ini tidak memiliki bagian bergerak yang kompleks, sehingga pemeliharaannya lebih mudah dan biaya operasionalnya lebih rendah dibandingkan dengan teknologi lainnya.
3. Skalabilitas dan Fleksibilitas: Kolom gelembung pancaran mudah disesuaikan dengan berbagai skala operasi, mulai dari skala laboratorium hingga skala industri. Fleksibilitas ini memungkinkan penggunaannya pada berbagai ukuran pabrik pupuk urea tanpa perlu modifikasi besar.
4. Ramah Lingkungan: Teknologi ini dapat beroperasi tanpa penambahan bahan kimia berbahaya, sehingga mengurangi potensi pencemaran sekunder. Penghilangan amonia dengan kolom gelembung pancaran juga dapat diintegrasikan dengan proses lain seperti biofiltrasi atau adsorpsi, untuk mencapai hasil yang lebih optimal.
5. Potensi Integrasi dengan Proses Lain: Kolom ini dapat digabungkan dengan teknologi lain seperti *stripping* udara atau pendinginan amonia untuk meningkatkan efisiensi keseluruhan dalam pengolahan limbah cair. Integrasi ini memungkinkan

- pengurangan beban amonia secara lebih efektif sebelum pelepasan limbah ke lingkungan.
6. Kendali Proses yang Mudah: Proses dalam kolom gelembung pancaran dapat dikendalikan dengan mudah melalui penyesuaian laju aliran gas atau variasi tekanan, sehingga memberikan fleksibilitas dalam pengaturan kondisi operasi yang optimal.

DAFTAR PUSTAKA

- Demergenci, N., Nuri, A. O., & Yildiz, E. (2012). Amonia removal by air stripping in a semi-batch jet loop reactor. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 399-404.
- Evans, G., & Machniewski, P. (1999). Mass transfer in a confined plugging liquid jet bubble column. *Chemical Engineering Science* 54, 4981-4990.
- Harahap, J., Zuhra, M., Yahya, H., & Lubis, S. S. (2022). Penyisihan Kadar Amonia (NH₃) Dengan Menggunakan Metode Moving Bed Biofilm Reactor (MMR) Sederhana Pada Limbah Industri Pupuk Urea. *Journal of Biological Science and Applied Biology*, 42-51.
- Kambuaya, B. (2014). *Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia, Nomor 5 Tahun 2014, Tentang Baku Mutu Air Limbah*. Jakarta: Kementerian Lingkungan Hidup.
- Nugroho, D. (2017). Pengaruh Diameter nozzle, Temperatur, dan pH terhadap Penyisihan Kadar Amonia Dengan Menggunakan Udara Stripping pada Kolom Gelembung Pancaran. *Jurnal Hasil Penelitian Industri, Vol.6, No.1*, 59-64.
- Nugroho, D. H., & Hasan, A. (2024). *Reaktor Kimia (Konsep Dasar Perancangan dan Studi Kasus Perhitungan Neraca Massa Reaktor Kimia dengan Menggunakan Polymath)*. Yogyakarta: Deepublish.
- Nugroho, D. H., Adisalamun, & Machdar, I. (2014). Pengaruh Nozzle Terhadap Aspek Hidrodinamika Kolom Gelembung Pancaran. *Jurnal Rekayasa Kimia dan Lingkungan*, 84-91.
- Nugroho, D. H., Adisalamun, & Machdar, I. (2014). Recovery of Amonia Solutions From Fertilizer Industri Wastewater by Air Stripping Using Jet Bubble Column. *The 5th Sriwijaya International Seminar on Energy and Environmental Science & Technology* (pp. 102-108). Palembang: Universitas Sriwijaya.
- Quan, X., Wang, F., Zhao, Q., Zhao, T., & Xiang, J. (2009). Air Stripping of Amonia in a Water-sparged aerocyclone reactor. *Journal of Hazardous Materials*, 983-988.

BAB 4

PEMANFAATAN LIMBAH SEBAGAI SUMBER ENERGI ALTERNATIF (WASTE TO ENERGY)

4.1 Pendahuluan

Limbah secara umum ada yang berupa limbah padat, limbah cair, dan limbah B3 (bahan beracun dan berbahaya). Limbah padat dapat berasal dari rumah tangga, industri, pertanian, dan peternakan. Ada juga limbah yang berupa energi panas yang dihasilkan oleh kerja dari suatu mesin. Limbah yang tidak tertangani dengan baik akan menimbulkan dampak yang negatif bagi lingkungan.

Penanganan limbah yang benar sangat diperlukan agar limbah tidak mencemari atau berdampak buruk bagi lingkungan. Salah satu upaya penanganan limbah adalah dengan menjadikan limbah sebagai sumber energi alternatif (*waste to energy*) terutama untuk bahan bakar. Pemanfaatan limbah sebagai sumber energi alternatif dapat dilakukan secara langsung maupun tidak langsung. Pemanfaatan secara langsung adalah dengan menggunakan limbah tersebut sebagai sumber energi yaitu bahan bakar tanpa melalui proses pengolahan terlebih dahulu. Pemanfaatan secara tidak langsung adalah dengan melalui proses pengolahan terlebih dahulu kemudian baru dijadikan bahan bakar atau bisa juga limbah tersebut diproses menjadi energi yang lain misalnya energi listrik.

Pemanfaatan limbah padat secara langsung untuk bahan bakar contohnya adalah biomassa yang dibakar langsung untuk bahan bakar tungku. Biomassa juga dapat diolah menjadi arang ataupun briket sebelum dijadikan bahan bakar dengan harapan menjadi lebih mudah dan mempunyai nilai guna yang lebih tinggi.

Limbah cair ada yang dapat dijadikan sumber energi alternatif misalnya untuk memproduksi biogas. Produksinya dilakukan melalui proses fermentasi sehingga menghasilkan gas mampu bakar dengan nilai kalor yang cukup tinggi. Beberapa jenis mesin menghasilkan panas yang cukup besar dan harus dibuang ke lingkungan supaya

mesin tersebut dapat berfungsi dengan baik. Limbah panas yang dihasilkan berpotensi untuk dimanfaatkan sebagai sumber energi.

Pemanfaatan limbah sebagai sumber energi alternatif diharapkan dapat menjadi salah satu upaya penanganan limbah agar tidak menimbulkan dampak negatif bagi lingkungan. Pemanfaatan limbah untuk sumber energi juga akan meningkatkan nilai guna dari limbah tersebut.

4.2 Limbah Padat sebagai Sumber Energi

Limbah padat tertentu dapat dijadikan sumber energi yaitu untuk bahan bakar. Limbah padat dapat dijadikan bahan bakar dengan beberapa pertimbangan, di antaranya adalah: kondisi ketersediaannya, nilai kalor dan efek pembakaran yang ditimbulkan bagi lingkungan. Limbah padat yang umum untuk dijadikan bahan bakar adalah biomassa yang berasal dari limbah pertanian maupun industri. Contoh biomassa yang dapat digunakan untuk bahan bakar adalah sisa-sisa kayu dari proses pertanian maupun industri. Terbentuknya biomassa pada tanaman terjadi melalui proses fotosintesis tanaman yang menyerap CO_2 dari lingkungan dan memanfaatkan energi sinar matahari. Oleh karena itu biomassa meskipun dalam proses pembakarannya menghasilkan CO_2 tapi digolongkan dalam zero karbon. Hal itu karena selama proses pembentukan biomassa tersebut tanaman menyerap karbon dari lingkungan dalam jumlah yang lebih banyak apabila dibandingkan dengan karbon yang dihasilkan dari proses pembakarannya.

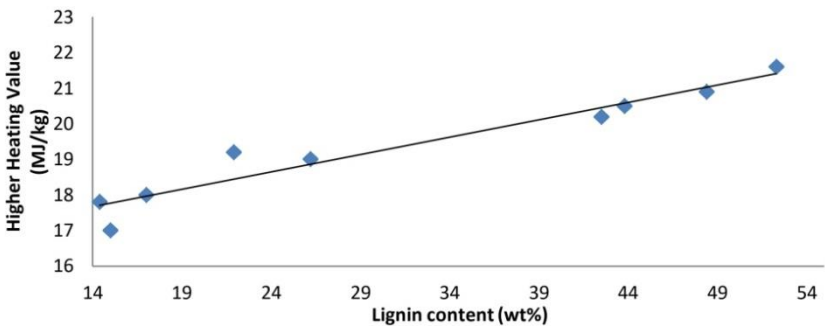
4.2.1 Nilai Kalor Limbah Biomassa

Kayu merupakan bagian dari tanaman yang telah mengalami lignifikasi atau pengkayuan. Limbah kayu dapat berupa potongan atau bagian kayu yang tidak terpakai, ranting pohon, serpihan kayu, serbuk gergajian, dan lain sebagainya. Limbah kayu dapat digunakan secara langsung untuk menghasilkan energi sebagai bahan bakar tanpa melalui proses pengolahan. Limbah kayu dapat dibakar sebagai bahan bakar untuk memasak di rumah tangga atau untuk memanaskan boiler di industri. Kayu mempunyai nilai kalor yang cukup tinggi

sekitar 4000 kCal/kg. Nilai kalor hasil pembakaran biomassa dapat dihitung menggunakan persamaan 5.1.

$$HHV = 0,312 (FC) + 0,1534 (VM) \quad (4.1)$$

HHV adalah nilai kalor biomassa (MJ/kg), FC adalah unsur karbon (%), dan VM adalah bahan volatil (%). Nilai kalor biomassa dipengaruhi oleh kandungan karbon, kadar abu, kadar air, dan bahan volatilnya. Nilai kalor biomassa juga dipengaruhi oleh kandungan ligninnya. Semakin tinggi kandungan lignin suatu biomassa maka nilai kalornya juga akan semakin tinggi. Grafik hubungan antara kandungan lignin dan nilai kalor sampel biomassa hasil penelitian adalah seperti Gambar 4.1.



Gambar 4.1. Grafik hubungan antara kandungan lignin dan nilai kalor dari sampel biomassa (Acar *et.al.*, 2016)

Bahan biomassa dari kayu yang keras mempunyai kandungan lignin yang tinggi sehingga nilai kalornya juga tinggi. Bahan biomassa kayu yang lunak mempunyai kandungan lignin yang rendah, sehingga nilai kalornya juga rendah. Daftar nilai kalor beberapa jenis biomassa adalah seperti yang disajikan dalam **Tabel 4.1**.

Tabel 4.1. Daftar Nilai Kalor Beberapa Jenis Biomassa

No	Nama Biomassa	Nilai Kalor HHV (MJ/kg)
1	Bambu**	17,32
2	Batang Jagung**	16,55
3	Batang Karet**	19,74
4	Batang Tembakau*	17,7
5	Daun Kelapa Sawit**	14,15
6	Jerami Padi**	18,8
7	Kotoran sapi**	16,78
8	Limbah teh*	17,1
9	Rumput **	15,54
10	Sekam kacang**	19,16
11	Tempurung kelapa**	17,66
12	Tongkol Jagung**	16,73

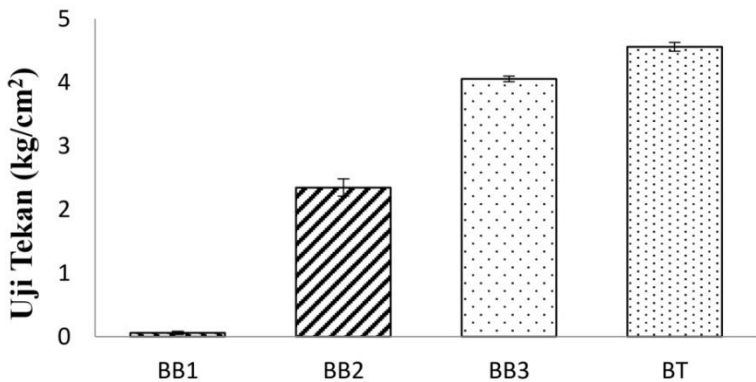
Sumber: * Demirbas (1997) ; ** Dirgantara et.al. (2019)

4.2.2 Pembriketan Limbah Biomassa

Limbah biomassa dapat diproses terlebih dahulu sebelum dijadikan bahan bakar. Salah satu prosesnya adalah pembriketan biomassa. Pembriketan biomassa akan memberikan beberapa keuntungan, di antaranya adalah: penyimpanan menjadi lebih mudah, penggunaannya lebih mudah, pengangkutan lebih mudah, nilai guna atau ekonominya juga akan lebih tinggi. Pembriketan dapat dilakukan secara langsung atau bahan dipirolisis terlebih dahulu untuk meningkatkan nilai kalor biomassa.

Bahan limbah biomassa yang dapat dijadikan briket di antaranya adalah: serbuk gergajian kayu, batok kelapa, sekam, dan sebagainya. Bahan limbah berupa gergajian kayu dapat dibriketkan secara langsung karena ukurannya sudah kecil-kecil. Limbah gergajian dicampur dengan perekat kemudian dicetak dan dikeringkan. Bahan perekat briket yang umum digunakan adalah dari bahan tapioka, akan tetapi tapioka termasuk bahan pangan. Bahan pangan diusahakan sedapat mungkin untuk tidak dijadikan sebagai bahan bakar. Hal itu karena kalau dalam jumlah yang besar, dikhawatirkan akan dapat mengganggu pemenuhan kebutuhan pangan. Oleh karena itu

diperlukan beberapa bahan alternatif yang dapat menggantikannya. Beberapa alternatif bahan perekat yang berpotensi untuk digunakan sebagai perekat briket adalah daun-daunan yang tidak digunakan untuk pangan. Daun-daunan banyak mengandung pektin yang dapat berfungsi sebagai perekat. Salah satu contoh briket biomassa dengan perekat dari daun-daunan adalah briker serbuk gergaji kayu bayur dengan perekat daun biduri. Hasil Pengujian briket serbuk gergaji kayu bayur dengan perekat daun biduri adalah seperti **Gambar 4.2**.



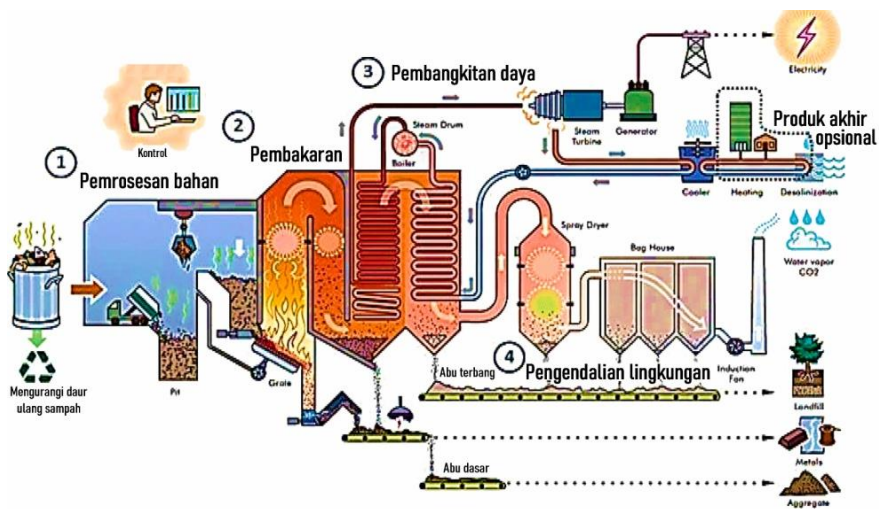
Gambar 4.2. Hasil uji kuat tekan briket serbuk gergajian kayu bayur dengan perekat daun biduri (Rahmanto *et.al.*, 2020)

Berdasarkan Gambar 4.2 dapat diketahui bahwa briket serbuk gergaji kayu bayur dengan perekat daun biduri 45% (BB3) mempunyai kuat tekan yang tidak jauh berbeda dengan perekat tapioka 10% (BT). Hal itu menunjukkan bahwa daun-daunan berpotensi untuk menjadi bahan alternatif perekat briket.

4.2.3 Sampah Padat untuk Pembangkit Listrik

Limbah padat dari sampah umum di tempat pemrosesan akhir sampah (TPA) dapat dijadikan sebagai bahan bakar untuk memanaskan boiler sehingga menghasilkan uap yang dapat memutar turbin untuk sumber tenaga generator pembangkit listrik. Banyak negara yang sudah memanfaatkan sampah padat sebagai bahan bakar boiler untuk pembangkit listrik. Pembangkit listrik tenaga sampah (PLTSa) di Indonesia sudah ada beberapa yang beroperasi. Salah satunya adalah PLTSa Bantar Gebang di Bekasi yang merupakan

Pilot Plant PLTSa di Indonesia. PLTSa Bantar Gebang dapat membakar hingga 100 ton sampah per hari untuk sumber energi boiler pembangkit listriknya. Daya listrik yang dibangkitkan dapat mencapai sekitar 700 kW. PLTSa yang lebih dahulu ada dan beroperasi adalah PLTSa Benowo di Surabaya yang memanfaatkan sampah dari TPA Benowo dengan kapasitas yang lebih besar. Sebelum digunakan untuk bahan bakar boiler sampah dipilah terlebih dahulu untuk mendapatkan kualitas bahan bakar yang baik. Skema Pembangkit listrik tenaga sampah secara umum adalah seperti **Gambar 4.3**.



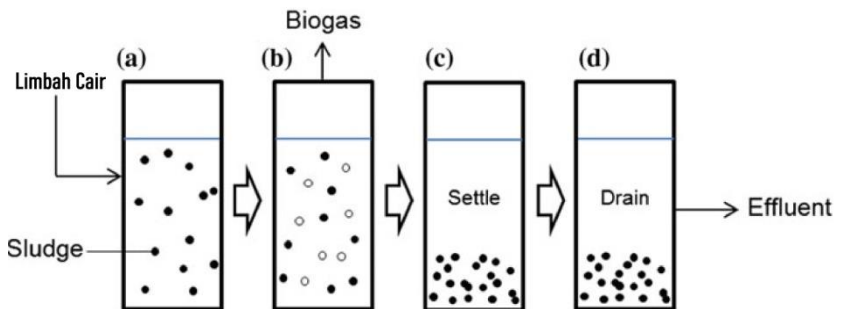
Gambar 4.3. Skema pembangkit listrik tenaga sampah (Asim *et al.*, 2023)

4.3 Limbah Cair sebagai Sumber Energi

Limbah cair ada yang berpotensi untuk dijadikan sebagai sumber energi. Limbah cair dapat dikombinasi dengan limbah padat untuk difermentasi menghasilkan gas mampu bakar seperti gas metana. Limbah cair dapat berasal dari limbah industri, limbah pertanian ataupun peternakan, dan limbah rumah tangga. Salah satu limbah cair yang berpotensi untuk bahan baku biogas dalam jumlah besar adalah limbah limbah cair dari pengolahan kelapa sawit yang disebut dengan POME (*Palm Oil Mill Effluent*). Setiap satu ton minyak sawit yang dihasilkan meninggalkan limbah POME lebih dari 2 m³.

Selain POME ada limbah cair dari pabrik gula tebu yaitu molase dapat dijadikan sebagai bahan baku untuk produksi bioetanol karena memiliki kandungan gula yang cukup tinggi.

Limbah cair misalnya dari peternakan dapat dikombinasi dengan limbah padat untuk diproses menjadi biogas. Prosesnya memerlukan beberapa peralatan dan komponen pendukung. Bahan baku biogas dimasukkan ke dalam digester atau tabung pencernaan untuk proses fermentasi tanpa udara (*anaerobik*). Biogas akan ditampung dalam gasbag sebelum dimanfaatkan. Proses ini memerlukan peralatan pendukung seperti filter dan penjerap untuk mengurangi uap air dan gas-gas yang lain yang dapat mengganggu kualitas biogas yang dihasilkan. Bahan buangan dari proses biogas dalam bentuk padat dapat dimanfaatkan untuk bahan pupuk organik. Salah satu bioreaktor untuk biogas adalah ASBR (*Anaerobic Sequencing Batch Reactor*). Skema bioreaktor ASBR adalah seperti Gambar 4.4.



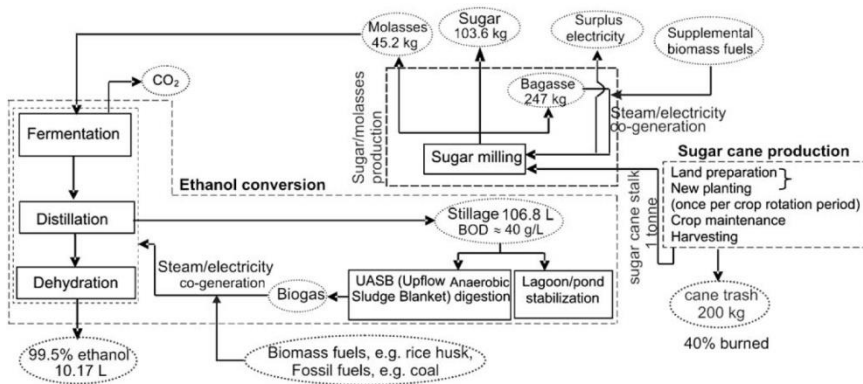
Gambar 4.4. Skema Reaktor Biogas ASBR (Valijanian et.al., 2018)

Limbah cair molase atau tetes tebu dari pabrik gula dapat diproses menjadi bioetanol melalui fermentasi. Molase masih mengandung sukrosa sekitar 48,8 %. Komponen gula akan diubah menjadi bioetanol melalui fermentasi dengan bantuan mikroorganisme, salah satunya adalah *Saccharomyces cerevisiae*. Pembuatan bioetanol dari molase masih tergolong dalam bioetanol generasi pertama yang tidak memerlukan energi yang tinggi apabila dibandingkan dengan produksi bioetanol generasi dua ataupun selanjutnya.

Pemanfaatan molase menjadi bahan baku pembuatan bioetanol merupakan salah satu cara penanganan limbah. Beberapa pabrik gula sudah mempunyai unit produksi bioetanol dengan dengan bahan baku molase yang merupakan hasil samping dari pengolahan tebu menjadi gula. Perusahaan penghasil bioetanol dari molase di antaranya adalah sebagai berikut ini.

1. Pabrik Alkohol Spirtus Jatiroto di Lumajang Jawa Timur.
2. PT. Malindo Raya Industrial di Malang Jawa Timur.
3. PT. Madubaru - PG. Madukismo di Bantul Daerah Istimewa Yogyakarta.
4. PSA Palimanan - PT PG Rajawali II di Cirebon Jawa Barat, dan lain sebagainya.

Skema produksi bioetanol dari bahan baku molases dalam sistem produksi gula tebu adalah seperti Gambar 4.5.



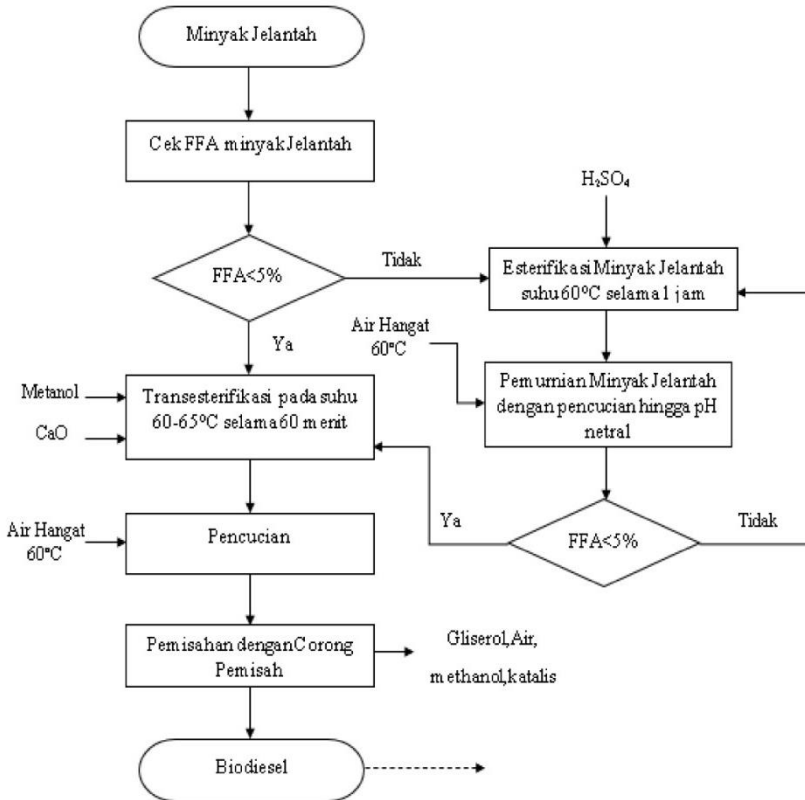
Gambar 4.5. Diagram alir produksi etanol dari molase tebu (Nguyen *et.al.*, 2008)

4.4 Limbah B3 sebagai Sumber Energi

Limbah B3 akan menimbulkan dampak yang buruk bagi lingkungan apabila tidak tertangani dengan baik. Limbah B3 ada yang berpotensi sebagai sumber energi alternatif atau bahan bakar. Limbah B3 yang berpotensi untuk bahan bakar di antaranya adalah minyak goreng bekas (jelantah) dan minyak pelumas bekas.

Minyak jelantah merupakan minyak goreng yang sudah digunakan *beberapa kali untuk proses penggorengan dan akhirnya menjadi limbah*. Minyak jelantah dikategorikan sebagai limbah B3 karena minyak jelantah mengandung beberapa senyawa berbahaya seperti: hidrokarbon aromatik polisiklik (PAH), dioksin, furan ataupun zat lainnya yang bersifat karsinogenik yang berpotensi menimbulkan penyakit kanker.

Minyak jelantah secara umum dapat dibuat menjadi biodiesel melalui proses pemurnian, esterifikasi, transesterifikasi, dan pencucian. Proses pemurnian meliputi despicing, netralisasi, dan bleaching. Proses esterifikasi dilakukan karena bilangan asam (FFA) yang dihasilkan dari minyak jelantah hasil pemurnian masih terlalu tinggi nilainya. Proses esterifikasi menghasilkan air dan ester. Proses transesterifikasi adalah proses untuk mengeluarkan gliserin dari minyak dan mereaksikan senyawa lemak bebasnya dengan senyawa alkohol menjadi metil ester. Oleh karena itu proses pembuatan biodiesel dari minyak jelantah menghasilkan produk samping berupa gliserin. Diagram alir proses produksi biodiesel dari minyak jelantah adalah seperti **Gambar 4.6**.



Gambar 4.6. Diagram alir pembuatan biodiesel dari minyak jelantah (Jaya *et.al.*, 2022)

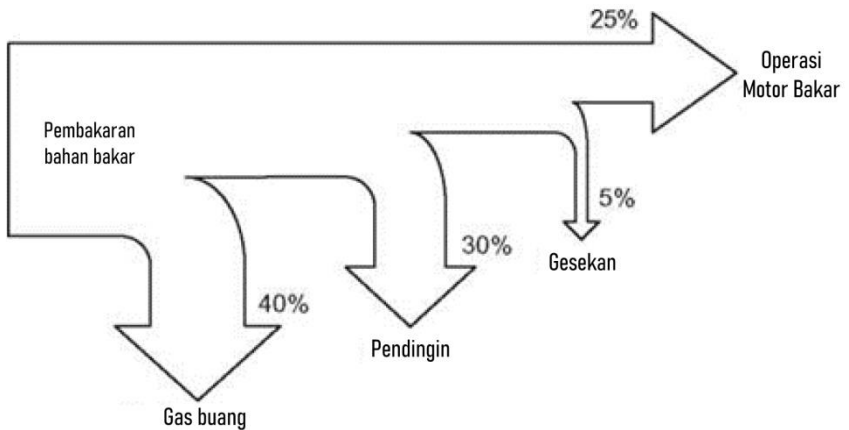
4.5 Limbah Panas sebagai Sumber Energi Alternatif

Beberapa jenis mesin banyak menghasilkan energi panas yang terbuang ke lingkungan. Contohnya adalah pembakaran pada motor bakar, panas keluaran kondensor mesin pendingin ruangan (AC), beban komplemen mikrohidro, dan sebagainya.

4.5.1 Pemanfaatan Limbah Panas Gas Buang Motor Bakar

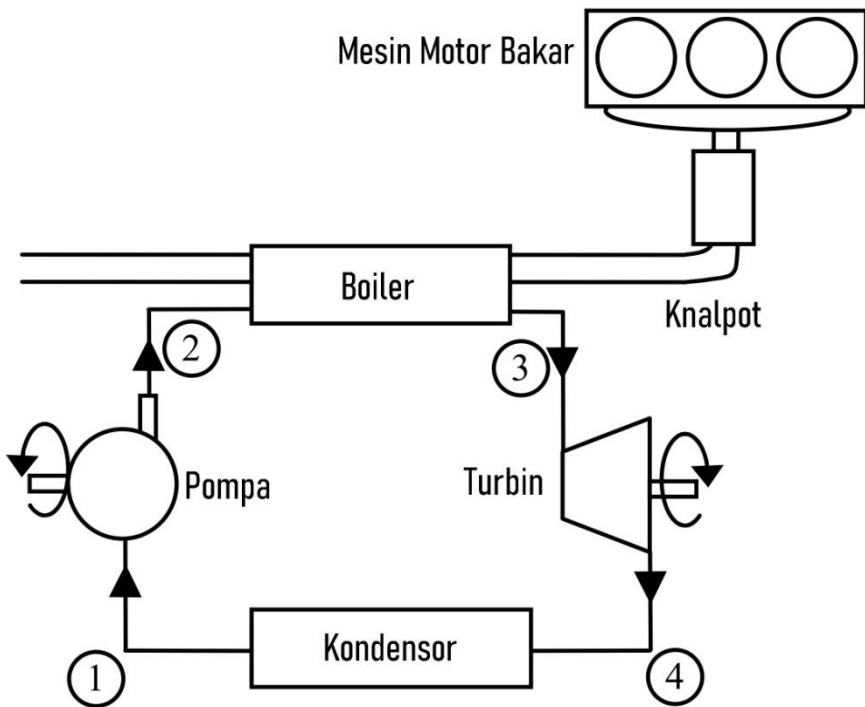
Hasil pembakaran bahan bakar pada sistem motor bakar hanya sekitar 25 % saja yang terkonversi menjadi energi mekanik. Energi panas lainnya terbuang ke lingkungan melalui gas buang knalpot motor bakar sekitar 40 % dan sistem pendingin mesin membuang panas sekitar 30%. Sisanya hilang melalui gesekan

mekanik. Aliran energi dalam suatu motor bakar adalah seperti **Gambar 4.7**.



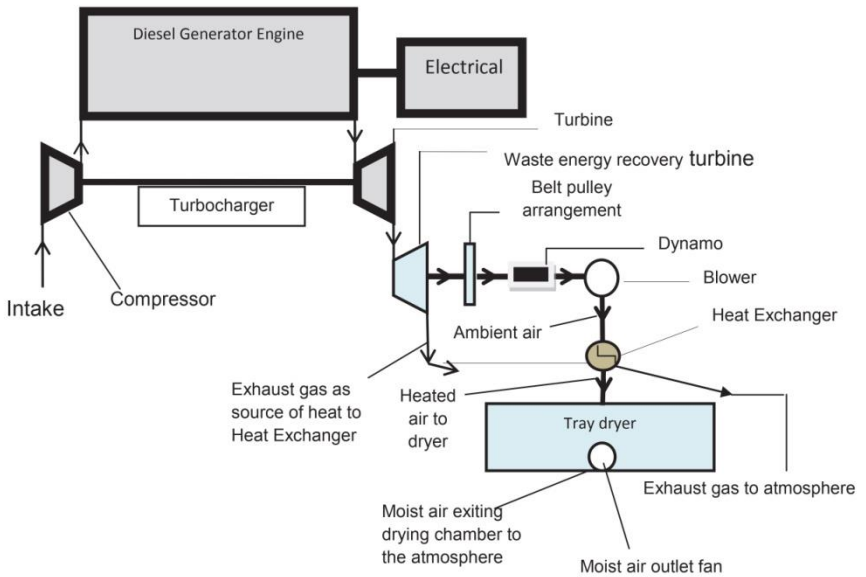
Gambar 4.7. Aliran Energi pada motor bakar (Avaritsioti, 2016)

Berdasarkan **Gambar 4.7** dapat diketahui bahwa sebagian besar energi panas hasil pembakaran bahan bakar motor bakar terbuang melalui gas buang dan sistem pendingin motor bakar. Panas yang terbuang tersebut akan meningkatkan suhu udara lingkungan. Oleh karena itu perlu upaya pemanfaatan panas tersebut. Salah satu pemanfaatannya adalah untuk sumber energi pemanas boiler yang dapat digunakan untuk menggerakkan turbin mini (**Gambar 4.8**). Hal itu memungkinkan untuk dilakukan karena suhu panas gas buang motor bakar dapat mencapai sekitar 700 K. Gas buang motor bakar dilewatkan ke penukar panas yang sekaligus berfungsi sebagai boiler. Air yang menuju boiler dapat dipanaskan terlebih dahulu dengan memanfaatkan panas dari sistem pendingin motor bakar, kemudian baru dipanasi ulang menggunakan panas gas buang motor bakar sehingga menghasilkan steam yang dapat digunakan untuk memutar turbin mini.



Gambar 4.8. Turbin uap dari panas gas buang motor bakar (Duparchy, 2009)

Mesin motor bakar yang berpotensi untuk dimanfaatkan energi panas buangnya adalah mesin skala besar seperti mesin kapal ataupun mesin penggerak stasioner misalnya genset atau motor bakar untuk penggilingan padi skala besar. Pemanfaatan panas gas buang motor bakar akan dapat menyerap energi dan mengurangi emisi panas ke lingkungan. Gas buang hasil pembakaran bahan bakar motor bakar dapat juga dimanfaatkan untuk sumber energi pengeringan melalui boiler dan penukar panas. Penggunaan boiler akan memudahkan pengaturan suhu yang diperlukan untuk proses pengeringan. Pengaturan tekanan boiler akan mengatur capaian suhu. Air dalam boiler dengan tekanan udara normal akan mendidih pada suhu 10°C . Air akan meningkat titik didihnya seiring dengan meningkatnya tekanan. Selama air mendidih tidak akan terjadi kenaikan suhu. Contoh skema pemanfaatan panas gas buang motor bakar untuk pengeringan adalah seperti **Gambar 5.9**.

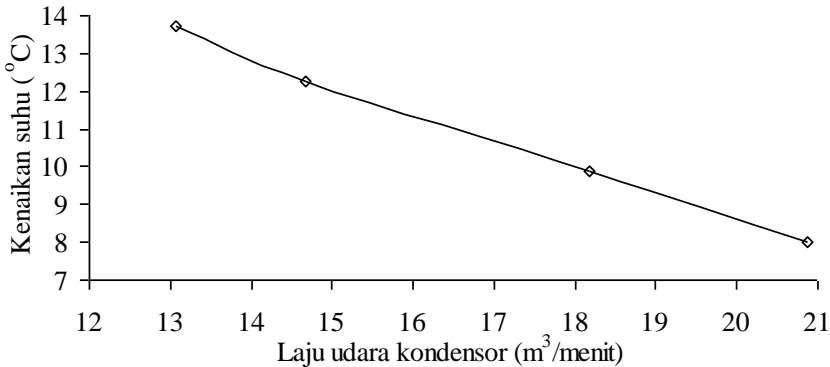


Gambar 4.9. Skema pemanfaatan panas buang motor bakar untuk pengeringan (Ononogbo *et.al.*, 2020)

4.5.2 Pemanfaatan Panas buang Mesin Pendingin Ruangan

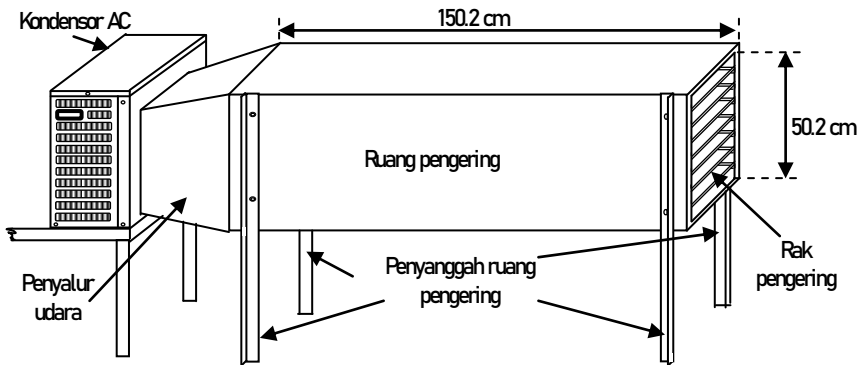
Mesin pendingin ruangan bekerja dengan memanfaatkan sistem mesin pendingin kompresi uap. Komponen utamanya adalah: Kompresor, kondensor, katup ekspansi, dan evaporator. Panas dari dalam ruangan diserap melalui evaporator melalui penguapan refrigerant (freon). Panas yang terserap oleh refrigerant kemudian dibuang ke lingkungan melalui penukar panas yang ada di kondensor.

Panas keluaran kondensor mesin pendingin biasanya terbuang ke lingkungan tanpa dimanfaatkan. Panas kondensor ini adalah merupakan gabungan dari panas yang diserap oleh evaporator ditambah dengan energi panas dari kerja kompresor. Kondensor mesin pendingin kompresi uap akan melepaskan panas dan menaikkan suhu udara yang melewatinya. Hasil penelitian Rahmanto *et.al.* 2011 menunjukkan bahwa udara keluaran kondensor akan meningkat sesuai dengan kecepatan aliran udara kondensor. Grafik hubungan antara debit udara lingkungan dan suhu udara keluaran kondensor mesin pendingin ruangan 1 PK adalah seperti **Gambar 4.10**.



Gambar 4.10. Grafik hubungan antar laju aliran udara kondensor dengan kenaikan suhu udara keluaran kondensor pada AC 1 PK (Rahmano *et.al.*, 2021)

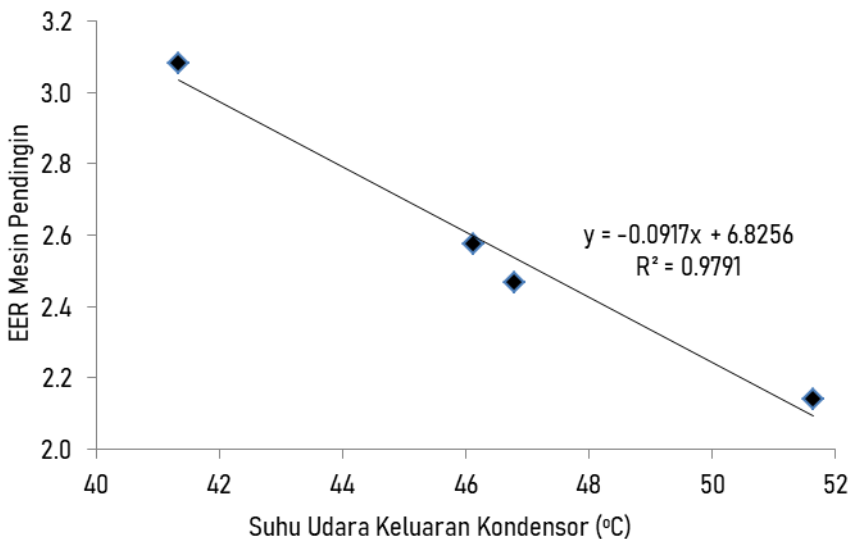
Panas buang kondensor AC dapat dimanfaatkan untuk proses pengeringan bahan pangan ataupun non pangan sesuai dengan kebutuhan. Pemanfaatannya dapat dilakukan dengan membuat penerus udara dan ruang pengering di depan kondensor. Contoh alat pengering dengan memanfaatkan panas kondensor AC adalah seperti **Gambar 4.11.**



Gambar 4.11. Alat pengering dengan memanfaatkan panas kondensor AC (Rahmano *et.al.*, 2011)

Pemanfaatan panas kondensor AC tidak akan mengganggu kinerja pendinginan AC. Hal itu karena aliran udara kondensora tidak terhambat. Udara panas dari kondensora hanya sekedar dilewatkan

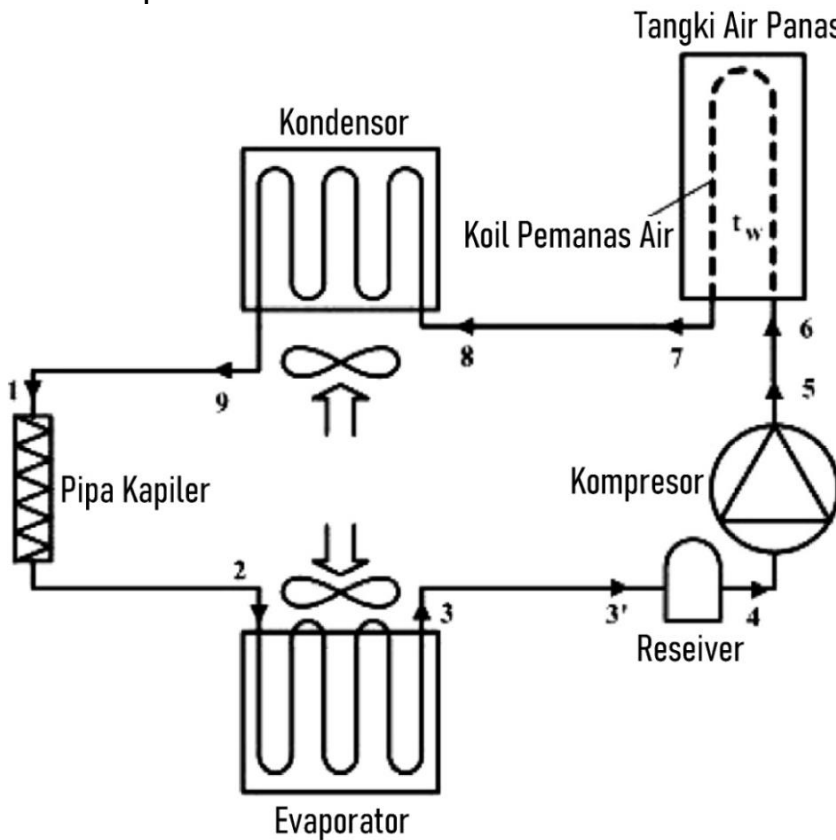
saja di ruang pengering kemudian udara akan menyerap uap air dari bahan yang dikeringkan sehingga proses pengeringan dapat terjadi. Akan tetapi rasio efisiensi energi (EER) mesin pendingin sangat dipengaruhi oleh suhu udara keluaran kondensor. Semakin tinggi suhu udara keluaran kondensor maka nilai EER akan semakin rendah (Gambar 4.12). Oleh karena itu upaya pemanfaatan panas terbuang kondensor AC dapat dilakukan dengan tetap memperhatikan kondisi suhu udara lingkungan dan suhu udara keluaran kondensor AC.



Gambar 4.12. Grafik hubungan suhu udara keluaran kondensor AC dan nilai EER (Rahmanto & Daniyati. 2022)

Panas kondensor AC juga dapat dimanfaatkan untuk pemanas air terutama untuk air mandi. Hal itu dapat dilakukan dengan menambahkan penukar panas yang diletakkan setelah kompresor dan sebelum penukar panas kondensor. Hal itu karena suhu pipa refrigerant yang paling tinggi adalah setelah keluar dari kompresor. Penukar panas ini akan berfungsi sebagai kondensor tambahan yang memindahkan panas dari refrigerant ke air yang akan dipanaskan. Suhu air akan meningkat dan refrigerant dapat didinginkan. Keberadaan alat penukar panas ini akan meringankan kerja kondensor AC. Penukar panas jenis ini sudah banyak produknya di pasaran dan sudah banyak digunakan oleh masyarakat. Salah satu

contohnya adalah pemanas air dengan sumber energi dari panas kondensor AC yang produksi oleh perusahaan BUMN yaitu PT. Wijaya Karya Industri Energi. Pemanfaatan panas kondensor AC untuk pemanas air akan berdampak pada penghematan penggunaan energi listrik. Skema pemanas air dengan memanfaatkan panas kondensor AC adalah seperti **Gambar 4.13**.



Gambar 4.13. Skema pemanas air dengan memanfaatkan energi kondensor AC (Techarungpaisan *et.al.*, 2007)

4.5.3 Pemanfaatan Energi Terbuang dari Beban Komplemen Mikrohidro

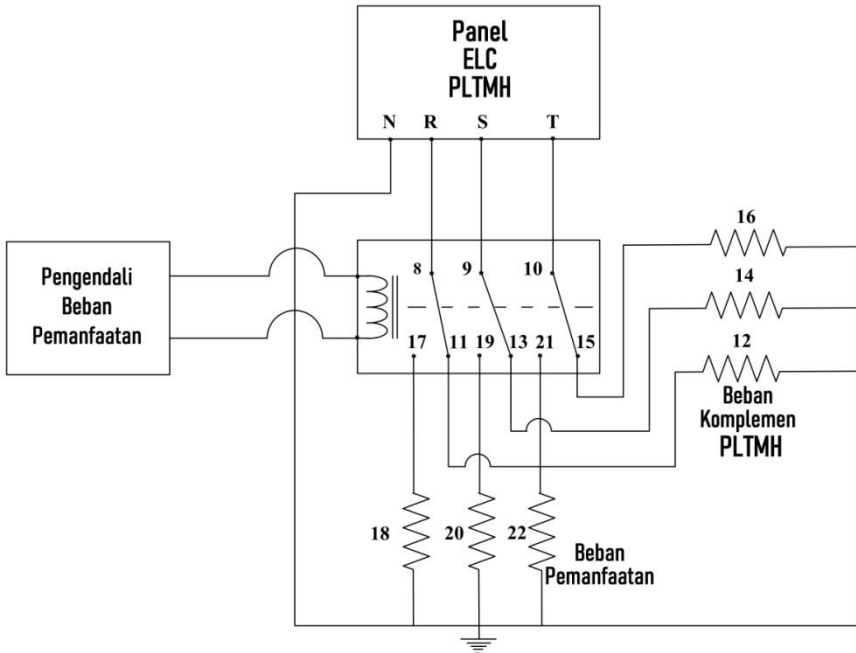
Pembangkit listrik tenaga mikrohidro (PLTMH) menghasilkan listrik dari aliran air yang melalui turbin kemudian turbin air akan memutar generator sehingga menghasilkan listrik. PLTMH pada umumnya dilengkapi dengan pengendali beban elektronik (ELC) dan beban komplemen yang akan menjaga agar beban generator PLTMH

selalu tetap meskipun beban konsumen berubah-ubah. Apabila beban konsumen belum terhubung maka seluruh energi listrik yang dihasilkan oleh PLTMH akan disalurkan oleh ELC ke beban komplemen yang berupa elemen pemanas listrik. Setelah beban konsumen terhubung maka suplai listrik ke beban komplemen akan berkurang secara otomatis sebesar beban konsumen yang terhubung. Suplai listrik ke beban komplemen akan berubah-ubah sesuai dengan beban konsumen secara otomatis melalui kendali ELC, sehingga tegangan dan frekuensi listrik yang dihasilkan tetap stabil.

Energi listrik yang tersalurkan ke beban komplemen PLTMH umumnya terbuang begitu saja ke lingkungan dalam bentuk panas tanpa dimanfaatkan. Sebenarnya potensi energi listrik PLTMH yang terbuang ke lingkungan melalui beban komplemen cukup besar. Contohnya adalah potensi energi terbuang di PLTMH Gunung Sawur 1 yang pernah diteliti oleh Rahmanto dan Femintasari (2018). PLTMH tersebut menghasilkan listrik dengan daya yang terbangkit sekitar 14 kw dan membuang energi listrik ke lingkungan melalui beban komplemen rata-rata sebesar 66,1 kwh per hari dengan tegangan di beban komplemen yang fluktuatif mulai dari 0 hingga lebih dari 100 V. Energi listrik terbuang dari PLTMH melalui beban komplemen berpotensi dimanfaatkan, akan tetapi karena tegangannya fluktuatif maka pemanfaatannya hanya digunakan untuk sistem pemanas. Misalnya pemanas air untuk penyediaan air panas ataupun untuk distilasi air guna mendapatkan air murni. Pemanfaatan lainnya yang memungkinkan adalah sebagai sumber pemanas untuk proses pengeringan.

Pemanfaatan energi yang terbuang dari beban komplemen PLTMH dapat dilakukan dengan cara mengalihkan koneksi listrik dari ELC yang seharusnya terhubung ke beban komplemen dialihkan ke beban pemanfaatan. Hal yang penting untuk diperhatikan adalah daya beban pemanfaatan harus sama dengan daya beban komplemen yang digantikan. Hal itu dimaksudkan agar proses pengendalian beban pada PLTMH tetap dapat berfungsi dengan baik dan tidak terganggu karena adanya beban pemanfaatan tersebut. Apabila elemen pemanas untuk beban pemanfaatan mempunyai daya yang lebih kecil ataupun lebih besar dari elemen pemanas beban komplemen yang digantikan maka kemungkinan akan mengganggu sistem pengendalian pada PLTMH.

Pemindahan koneksi listrik dapat dilakukan dengan menggunakan saklar handle atau bisa juga menggunakan relay ataupun kontaktor. Contoh skema pemanfaatan energi listrik dari beban komplemen PLTMH adalah seperti **Gambar 4.14**.



Gambar 4.14. Skema pemanfaatan energi listrik beban komplemen PLTMH (Adaptasi dari Rahmanto & Femintasari, 2019)

DAFTAR PUSTAKA

- Acar, S., Ayanoglu, A., & Demirbas, A. 2016. Determination of higher heating values (HHVs) of biomass fuels. *Uluslararası Yakıtlar Yanma Ve Yangın Dergisi*, (3), 1-3.
- Ahmad, H. S., Bialangi, N., & Salimi, Y. K. 2016. Pengolahan minyak jelantah menjadi biodiesel. *Jambura Journal of Educational Chemistry*, 11 (2), 204-214.
- Asim, M., Kumar, R., Kanwal, A., Shahzad, A., Ahmad, A., & Farooq, M. 2023. Techno-economic assessment of energy and environmental impact of waste-to-energy electricity generation. *Energy Reports*, 10, 3373-3382.
- Avaritsioti, E. 2016. Environmental and economic benefits of car exhaust heat recovery. *Transportation research procedia*, 14, 1003-1012.
- Choong, Y. Y., Chou, K. W., & Norli, I. 2018. Strategies for improving biogas production of palm oil mill effluent (POME) anaerobic digestion: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 2993-3006.
- Cooper, C. 2015. *The Basics of Electric Current*. The Rosen Publishing Group. New York
- Demirbas, A. 1997. Calculation of higher heating values of biomass fuels. *Fuel*, 76 (5), 431-434
- Demirbas, A. 2016. *Waste energy for life cycle assessment*. Springer. Switzerland
- Dirgantara, M., Kristian, N., & Karelius, K. (2019). Evaluasi Prediksi Nilai Higher Heating Value (HHV) Biomassa Berdasarkan Analisis Ultimate: Evaluation of Prediction Higher Heating Value (HHV) of Biomass-Based on Ultimate Analysis. *Jurnal Jejaring Matematika dan Sains*, 1 (2), 107-113
- Duparchy, A., Leduc, P., Bourhis, G., & Ternel, C. 2009. Heat recovery for next generation of hybrid vehicles: Simulation and design of a Rankine cycle system. *World Electric Vehicle Journal*, 3 (3), 440-456.
- Jaya, D., T. Wahyu Widayati, H. Salsabiela, and M. F. Abdul Majid. 2022. Pembuatan biodiesel dari minyak jelantah

- menggunakan katalis heterogen. *Eksergi*, vol. 19, no. 1, p. 29-34
- Jayus, J., Noorvita, I. V., & Nurhayati, N. 2017. Produksi bioetanol oleh *Saccharomyces cerevisiae* FNCC 3210 pada media molases dengan kecepatan agitasi dan aerasi yang berbeda. *Jurnal Agroteknologi*, 10(02), 184-192.
- Jayus, J., Rini, A. W. E., Sugiharto, B., & Rahmanto, D. E. (2022). Isolasi dan Identifikasi Khamir Toleran Alkohol dari Molase. *Biota: Jurnal Ilmiah Ilmu-Ilmu Hayati*, 1-10.
- Ji, J., Chow, T. T., Pei, G., Dong, J., & He, W. 2003. Domestic air-conditioner and integrated water heater for subtropical climate. *Applied Thermal Engineering*, 23 (5), 581-592.
- Nguyen, T. L. T., & Gheewala, S. H. (2008). Life cycle assessment of fuel ethanol from cane molasses in Thailand. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 13, 301-311.
- Nurhayati, T., Setiawan, D., & Mahpudin, M. 1997. Hasil destilasi kering dan nilai kalor 15 jenis kayu. *Buletin Penelitian Hasil Hutan*, 15 (4), 291-298.
- Ononogbo, C., Nwufu, O. C., Okoronkwo, C. A., Ogueke, N. V., Igbokwe, J. O., & Anyanwu, E. E. 2020. Equipment sizing and method for the application of exhaust gas waste heat to food crops drying using a hot air tray dryer. *Indian Journal of Science and Technology*, 13 (5), 502-518.
- Parascanu, M. M., Sanchez, N., Sandoval-Salas, F., Carreto, C. M., Soreanu, G., & Sanchez-Silva, L. 2021. Environmental and economic analysis of bioethanol production from sugarcane molasses and agave juice. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 64374-64393.
- Qodriyatun, S. N. 2021. Pembangkit listrik tenaga sampah: Antara permasalahan lingkungan dan percepatan pembangunan energi terbarukan. *Aspirasi: Jurnal Masalah-Masalah Sosial*, 12 (1), 63-84.
- Rahmanto, D. E., Subrata. I. D. M., Sutrisno. 2011. Pemanfaatan Panas Kondensor AC untuk Pengerinan Bahan Pangan: Studi Pengerinan Chips Kentang. Prosiding Seminar Nasional PERTETA 2011.

- Rahmanto, D. E. & Femintasari, V. 2018. An investigation of dummy load energy in gunung sawur 1 microhydro power plant-Lumajang East Java. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 207, No. 1 p. 012060. IOP Publishing
- Rahmanto, D. E., & Femintasari, V. 2019. Teknoekonomi alat pemurni air menggunakan energi listrik terbuang di PLTMH Gunung Sawur 1 Lumajang. *Jurnal Agroteknologi*. Vol. 13 No. 01 p. 92-97
- Rahmanto, D. E., Fitroni, E. H., & Rudiyanto, B. 2020. Pemanfaatan Daun Biduri (*Calotropis Gigantea*) Sebagai Perikat Pada Pembuatan Briket Serbuk Gergaji Kayu Bayur (*Pterospermum Javanicum*). *Rona Teknik Pertanian*, 13(1), 24-39.
- Rahmanto, D. E., Daniyati, R. 2022. *Investigasi Kinerja Mesin Pendingin Refrigerasi menggunakan R32 Berdasarkan Suhu Udara Evaporator*. Book Chapter: Rekayasa Keteknikan dan Teknologi Informasi Terapan. p49 – 62. Polije Press
- Rahmanto, D. E., Wibowo, M. J., Fahriannur, A., & Ghofur, A. 2022. Investigasi Listrik Mikrohidro di Perkebunan Gunung Pasang Kecamatan Panti Jember. *Jurnal Agroteknologi*. Vol. 16 No. 01 p. 29-36
- Rehan, M., Gardy, J., Demirbas, A., Rashid, U., Budzianowski, W. M., Pant, D., & Nizami, A. S. 2018. Waste to biodiesel: A preliminary assessment for Saudi Arabia. *Bioresource technology*, 250, p.17-25
- Techarungpaisan, P., Theerakulpisut, S., & Priprem, S. 2007. Modeling of a split type air conditioner with integrated water heater. *Energy Conversion and Management*, 48 (4), 1222-1237.
- Valijanian, E., Tabatabaei, M., Aghbashlo, M., Sulaiman, A., & Chisti, Y. (2018). Biogas production systems. *Biogas: Fundamentals, process, and operation*, 95-116.

BIODATA PENULIS



Dr. Nurhayati, S.TP, M.Si

Dosen Program Studi Teknologi Hasil Pertanian
Fakultas Teknologi Pertanian Universitas Jember

Kecintaan Saya kepada ibu pertiwi Indonesia, senantiasa mengisi relung hati tuk terus berkarya bagi nusa dan bangsa. Dilahirkan di Lumajang Jawa Timur 45 tahun silam. Lulusan cumlaude dari angkatan '97, selanjutnya menjadi dosen sejak 2004 pada almamaternya, Prodi THP FTP UNEJ. Pernah bekerja sebagai staf laboran di PT. Alu Aksara Pratama. Gelar master dan doktor ditempuh dari 2005-2011 pada Prodi Ilmu Pangan IPB. Hobi berbisnis di bidang pangan&hasil pertanian serta teknologinya. Beragam karya telah dihasilkan berupa publikasi populer, publikasi ilmiah pada jurnal nasional dan internasional bereputasi, buku ajar, buku teks/referensi, serta *granted* paten teknologi sesuai kompetensi bidangnya. Slogan untuk karyanya yakni "*Alhamdulillah, satu lagi, bagimu negeri, kami mengabd*".

Penulis dapat dihubungi melalui e-mail: nurhayati.ftp@unej.ac.id

BIODATA PENULIS



Theresia Evila Purwanti Sri Rahayu, S.T., M.Eng.

**Dosen Program Studi Teknik Pengendalian Pencemaran Lingkungan
Program Sarjana Terapan
Politeknik Negeri Cilacap**

Penulis lahir di Surakarta tanggal 25 Oktober 1984. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Teknik Pengendalian Pencemaran Lingkungan Program Sarjana Terapan, Politeknik Negei Cilacap. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Teknik Program Studi Teknik Kimia Universitas Sebelas Maret dan melanjutkan S2 pada Departemen Teknik Kimia Universitas Gadjah Mada Konsentrasi Magister Teknik Pengendalian Pencemaran Lingkungan. Penulis menekuni bidang kompetensi Pengelolaan Limbah Padat dan Pencemaran Udara dengan minat penelitian karbon aktif, adsorben, biochar, dan material karbon nano.

Penulis dapat dihubungi melalui e-mail: theresiaevila05@gmail.com

BIODATA PENULIS



Didiek Hari Nugroho, S.T., M.T

Dosen Program Studi D4 Teknologi Kimia Industri
Jurusan Teknik Kimia – Politeknik Negeri Sriwijaya

Penulis Lahir di Maumere, 30 Oktober 1980, adalah alumni Sarjana (S1) Teknik Kimia Universitas Indonesia dan Magister (S2) Teknik Kimia Universitas Syiah Kuala. Selain itu juga merupakan alumni pada Program Drilling, Production and Liquidified Natural Gas Applied Competencies di Southern Alberta Institute of Technology (SAIT), Calgary, Canada; Program IVLP di Wright State University, Ohio, U.S.A; dan Program Wastewater Treatment di Environment Protection Training and Research Institute (EPTRI), Hyderabad, India. Penulis aktif mengajar di Program Studi D4 Teknologi Kimia Industri, salah satunya mata kuliah teknologi pengolahan limbah dan praktikum teknologi pengolahan limbah. Selain mengajar, penulis juga aktif menulis buku dan melakukan penelitian di bidang teknologi proses kimia dan pengolahan limbah industri. Beberapa penelitian yang telah dilaksanakan oleh penulis dibiayai oleh DRPM Kemdikbudristek dan hasil penelitiannya juga diterbitkan di beberapa jurnal ilmiah nasional maupun internasional, buku, dan paten. Penulis sering juga di undang baik sebagai pembicara maupun konsultan yang merupakan bagian dalam melaksanakan kegiatan pengabdian kepada masyarakat. Penulis dapat dihubungi melalui e-mail: dh.nugroho@polsri.ac.id

BIODATA PENULIS



Dedy Eko Rahmanto, S.TP, M.Si
Dosen Program Studi Teknik Energi Terbarukan
Politeknik Negeri Jember

Penulis lahir di Ngawi tanggal 19 Juli 1978. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Teknik Energi Terbarukan Politeknik Negeri Jember. Penulis menyelesaikan pendidikan S1 di Program Studi Teknik Pertanian Universitas Jember pada tahun 2001. Penulis melanjutkan studi S2 di Program Studi Teknik Mesin Pertanian dan Pangan Institut Pertanian Bogor pada tahun 2009 dan selesai pada tahun 2011.

Penulis menjadi dosen tetap di Program Studi Teknik Energi Terbarukan Politeknik Negeri Jember sejak tahun 2016 hingga saat ini dan pernah menjadi dosen luar biasa di Program Studi tersebut pada tahun 2013 hingga 2015. Penulis pernah menjadi pengampu di beberapa mata kuliah seperti: Teknologi Mikrohidro, Sifat dan kekuatan bahan, Perancangan Sistem Energi, Sistem Termal, Mesin Pendingin, Elektronika Daya, dan sebagainya. Penulis aktif melakukan kegiatan Tri Dharma Perguruan Tinggi yang meliputi kegiatan Pendidikan, Penelitian, dan Pengabdian kepada Masyarakat terutama terkait bidang Energi Terbarukan.

Penulis dapat dihubungi melalui e-mail: dedy_eko@polije.ac.id