

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

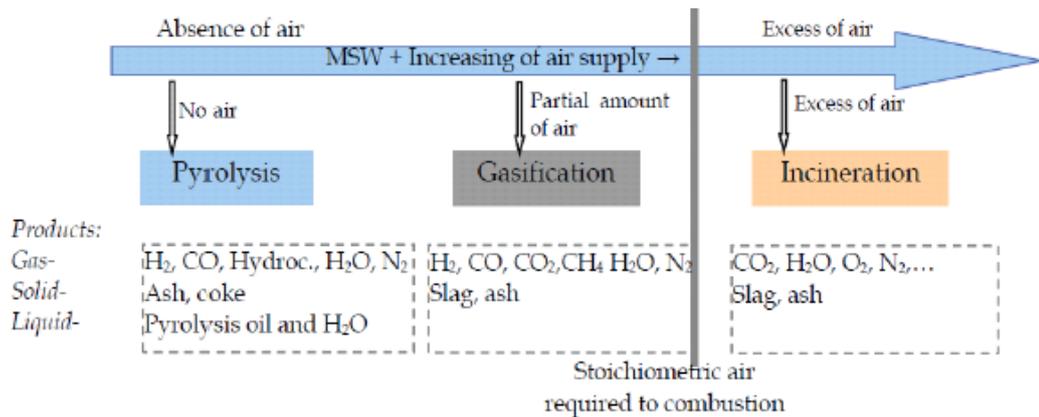
2.1 *Incinerator*

Incinerator adalah tungku pembakaran untuk mengolah limbah padat, yang mengkonversi materi padat (sampah) menjadi materi gas, dan abu, (*bottom ash* dan *fly ash*). *Incinerator* merupakan suatu alat penghancur atau pemusnah limbah organik melalui pembakaran dalam suatu sistem yang terkontrol dan terisolir dari lingkungan sekitarnya. Incinerasi dan pengolahan sampah bertemperatur tinggi lainnya didefinisikan sebagai pengolahan termal.

Insinerasi material sampah mengubah sampah menjadi abu, gas sisa hasil pembakaran, partikulat, dan panas. Gas yang dihasilkan harus dibersihkan dari polutan sebelum dilepas ke atmosfer. Panas yang dihasilkan bisa dimanfaatkan sebagai energi pembangkit listrik. *Incinerator* adalah alat untuk menghancurkan limbah berupa pembakaran dengan kondisi terkendali. Limbah dapat terurai dari senyawa organik menjadi senyawa sederhana seperti CO₂ dan H₂O.

Patrick (1980) dalam Arif Budiman (2001) menyatakan bahwa *incinerator* adalah alat yang digunakan untuk proses pembakaran sampah. Alat ini berfungsi untuk merubah bentuk sampah menjadi lebih kecil dan praktis serta menghasilkan sisa pembakaran yang sterill sehingga dapat dibuang langsung ke tanah. Energi panas hasil pembakaran dalam *incinerator* dapat diguankan sebagai energi alternative bagi proses lain seperti pemanasan atau pengeringan.

Dalam lingkup perlakuan termal limbah padat, Gambar 1 menunjukkan perbedaan dalam hal pirolisis, gasifikasi dan pembakaran dengan memperhatikan jumlah udara yang ada. Pada proses pirolisis limbah padat tidak memerlukan jumlah udara dan proses gasifikasi diperlukan sebagian jumlah udara, sedangkan pada proses pembakaran limbah padat diperlukan jumlah udara berlebih.

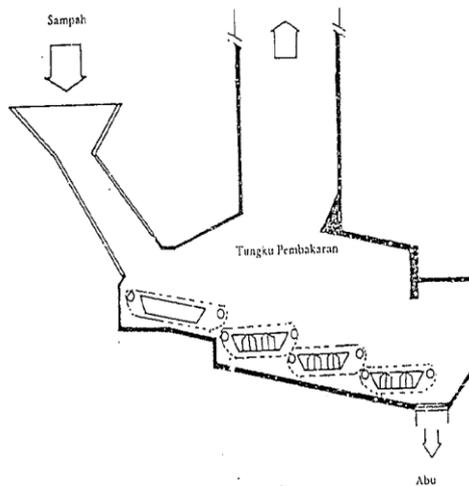


Gambar 1. Klasifikasi Teknologi Termal pada MSW (*Municipal Solid Waste*)

Sumber : Defra, 2007 dalam Wahyu Prastikasari, 2013

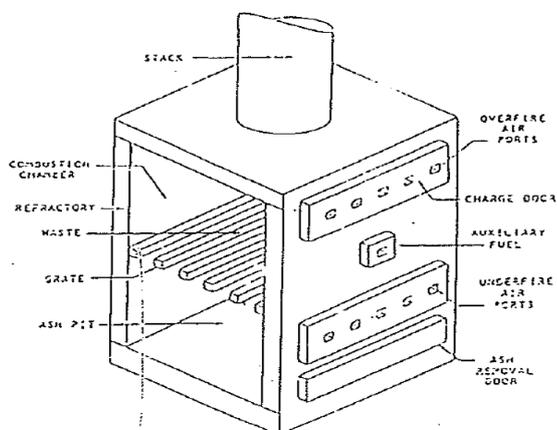
Untuk merancang alat pembakar sampah diperlukan beberapa pertimbangan untuk diperhatikan, yaitu jumlah udara pembakaran, sisa hasil pembakaran dan desain *incinerator*. Alat pembakaran sampah terdapat dua jenis berdasarkan metode pembakaran yang berlangsung pada alat tersebut, yaitu alat pembakar sampah tipe kontinyu dan tipe *batch*. Pada alat pembakar sampah tipe kontinyu, sampah dimasukkan secara terus-menerus dengan debit tetap (gambar alat pembakar sampah tipe kontinyu disajikan pada Gambar 2) sedangkan pada alat pembakaran sampah tipe *batch*, sampah dimasukkan sampai mencapai batas maksimum kemudian dibakar bersamaan (gambar alat pembakar sampah tipe *batch* disajikan pada Gambar 3).

Incinerator tipe *batch* terdiri dari 6 bagian utama yaitu ruang pembakaran, kasa penyulut api, ruang pengendapan bahan padat (hasil pembakaran), cerobong asap, lubang pemasukan udara dan system pindah panas. Gambar piktorial dari alat ini disajikan pada Gambar 4.



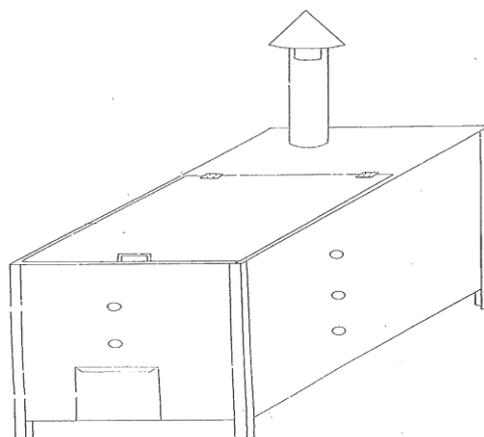
Gambar 2. Alat Pembakar Sampah Tipe Kontinyu

Sumber : <http://repository.ipb.ac.id/>



Gambar 3. Alat Pembakar Sampah Tipe *Batch*

Sumber : <http://repository.ipb.ac.id/>



Gambar 4. Gambar Piktorial *Incinerator* Tipe *Batch*

Sumber : <http://repository.ipb.ac.id/>

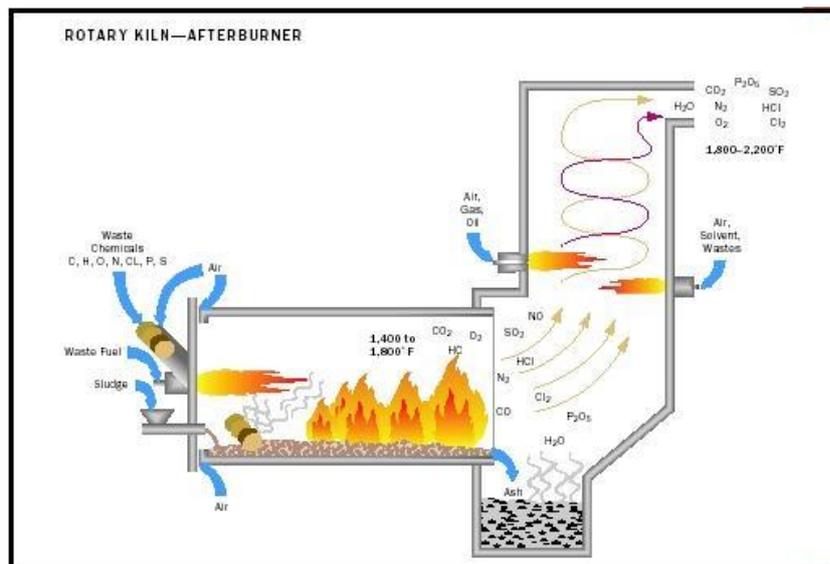
2.2 Jenis-Jenis Incinerator

Secara umum jenis *incinerator* yang paling umum diterapkan untuk membakar limbah padat B3 ialah *rotary kiln*, *multiple hearth*, dan *fluidized bed*

a. *Incinerator Rotary Kiln*

Tipe ini cocok untuk menginsinerasi limbah *sludge* ex WWT atau limbah yang mempunyai kandungan air (*water content*) yang cukup tinggi dan volumenya cukup besar. Sistem *incinerator* ini berputar pada bagian *primary chamber*, dengan tujuan untuk mendapatkan pembakaran limbah yang merata keseluruhan bagian.

Proses pembakarannya sama dengan *type static*, terjadi dua kali pembakaran dalam Ruang Bakar 1 (*Primary Chamber*) untuk limbah dan Ruang Bakar 2 (*Secondary Chamber* untuk sisa-sisa gas yang belum sempurna terbakar dalam *Primary Chamber*).



Gambar 5. *Incinerator Rotary Kiln*

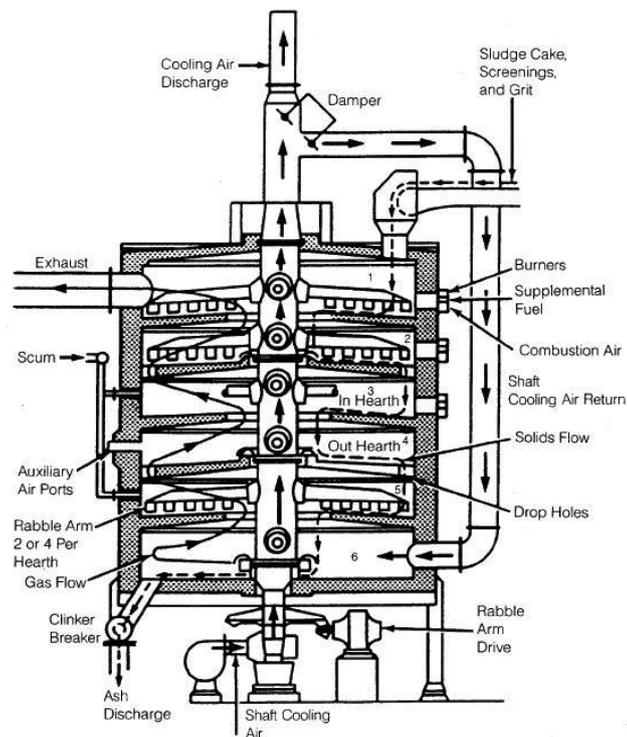
Sumber : <http://www.pollutionissues.com/Ho-Li/Incineration.html>

b. *Multiple Hearth Incinerator*

Multiple Hearth Incinerator, yang telah digunakan sejak pertengahan tahun 1900-an, terdiri dari suatu kerangka lapisan baja tahan api dengan serangkaian tungku (*hearth*) yang tersusun secara vertikal, satu di atas yang

lainnya dan biasanya berjumlah 5-8 buah tungku, *shaft rabble arms* beserta *rabble teeth*-nya dengan kecepatan putaran $\frac{3}{4} - 2$ rpm. Umpan sampah dimasukkan dari atas tungku secara terus menerus dan abu hasil proses pembakaran dikeluarkan melalui silo. Burner dipasang pada sisi dinding tungku pembakar di mana pembakaran terjadi. Udara diumpan masuk dari bawah, dan sampah diumpan masuk dari atas.

Limbah yang dapat diproses dalam *multiple hearth incinerator* memiliki kandungan padatan minimum antara 15-50 %-berat. Limbah yang kandungan padatannya di bawah 15 %-berat padatan mempunyai sifat seperti cairan daripada padatan. Limbah semacam ini cenderung untuk mengalir di dalam tungku dan manfaat *rabble* tidak akan efektif. Jika kandungan padatan di atas 50 % berat, maka lumpur bersifat sangat viscous dan cenderung untuk menutup *rabble teeth*. Udara dipasok dari bagian bawah *furnace* dan naik melalui tungku dengan membawa produk pembakaran dan partikel abu.



Gambar 6. *Multiple Hearth Incinerator*
 Sumber : <http://www.combustionportal.org/ssi.html>

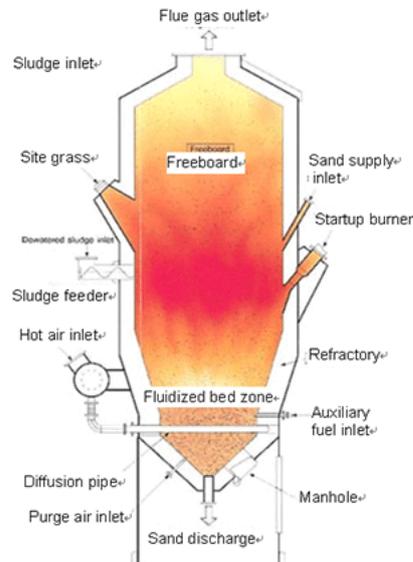
c. *Fluidized Bed Incinerator*

Fluidized bed incinerator adalah sebuah tungku pembakar yang menggunakan media pengaduk berupa pasir seperti pasir kuarsa atau pasir silika, sehingga akan terjadi pencampuran (*mixing*) yang homogen antara udara dengan butiran-butiran pasir tersebut. *Mixing* yang konstan antara partikel-partikel mendorong terjadinya laju perpindahan panas yang sangat cepat serta terjadinya pembakaran sempurna. *Fluidized bed incinerator* berorientasi bentuk tegak lurus, silindris, dengan kerangka baja yang dilapisi bahan tahan api, berisi hamparan pasir (*sand bed*) dan distributor untuk fluidasi udara. *Fluidized bed incinerator* normalnya tersedia dalam ukuran berdiameter dari 9 sampai 34 ft.

Pembakaran dengan teknologi *fluidized bed* merupakan satu rancangan alternatif untuk pembakaran limbah padat. Harapan pasir tersebut diletakkan di atas distributor yang berupa grid logam dengan dilapisi bahan tahan api. Grid ini berisi suatu pelat berpori nosel-nosel injeksi udara atau *tuyere* di mana udara dialirkan ke dalam ruang bakar untuk menfluidisasi hamparan (*bed*) tersebut. Aliran udara melalui nosel menfluidisasi hamparan sehingga berkembang menjadi dua kali volume sebelumnya. Fluidisasi meningkatkan pencampuran dan turbulensi serta laju perpindahan panas yang terjadi. Bahan bakar bantu digunakan selama pemanasan awal untuk memanaskan hamparan sampai temperatur operasi sekitar 750 sampai 900°C sehingga pembakaran dapat terjaga pada temperatur konstan. Dalam beberapa instalasi, suatu sistem *water spray* digunakan untuk mengendalikan temperatur ruang bakar.

Fluidized bed incinerator telah digunakan untuk macam-macam limbah termasuk limbah perkotaan dan limbah lumpur. Reaktor unggun atau hamparan fluidisasi (*fluidized bed*) meningkatkan penyebaran umpan limbah yang datang dengan pemanasan yang cepat sampai temperatur pengapiannya (*ignition*) serta meningkatkan waktu kontak yang cukup dan juga kondisi pencampuran yang hebat untuk pembakaran sempurna. Pembakaran normalnya terjadi sendiri, kemudian sampah hancur dengan cepat, kering dan terbakar di dalam *hamparan pasir*. Laju pembakaran sampah meningkat oleh kontak langsung dengan partikel hamparan yang panas. Aliran udara fluidisasi meniup abu halus dari hamparan.

Gas-gas pembakaran biasanya diproses lagi di *wet scrubber* dan kemudian abunya dibuang secara *landfill*.



Gambar 7. *Fluidized Bed Incinerator*

Sumber : http://www.tsk-g.co.jp/en/tech/industry/tsk_fbi.html

2.2.1 Ruang Bakar *Incinerator*

Jenis-jenis *incinerator* berdasarkan ruang bakar terbagi menjadi 2 (dua) yaitu *Primary Chamber* dan *Secondary Chamber*.

1. *Primary Chamber*

Berfungsi sebagai tempat pembakaran limbah. Kondisi pembakaran dirancang dengan jumlah udara untuk reaksi pembakaran kurang dari semestinya, sehingga disamping pembakaran juga terjadi reaksi pirolisa. Pada reaksi pirolisa material organik terdegradasi menjadi karbon monoksida dan metana. Temperatur dalam *primary chamber* diatur pada rentang 600°C-800°C dan untuk mencapai temperatur tersebut, pemanasan dalam *primary chamber* dibantu oleh energi dari burner dan energi pembakaran yang timbul dari limbah itu sendiri. Udara (oksigen) untuk pembakaran di suplai oleh blower dalam jumlah yang terkontrol.

Padatan sisa pembakaran di *primary chamber* dapat berupa padatan tak terbakar (logam, kaca) dan abu (mineral), maupun karbon berupa arang. Tetapi arang dapat diminimalkan dengan pemberian suplai oksigen secara

continue selama pembakaran berlangsung. Sedangkan padatan tak terbakar dapat diminimalkan dengan melakukan pensortiran limbah terlebih dahulu.

2. *Secondary Chamber*

Gas hasil pembakaran dan pirolisa perlu dibakar lebih lanjut agar tidak mencemari lingkungan. Pembakaran gas-gas tersebut dapat berlangsung dengan baik jika terjadi pencampuran yang tepat antara oksigen (udara) dengan gas hasil pirolisa, serta ditunjang oleh waktu tinggal (*retention time*) yang cukup. Udara untuk pembakaran di *secondary chamber* disuplai oleh blower dalam jumlah yang terkontrol.

Selanjutnya gas pirolisa yang tercampur dengan udara dibakar secara sempurna oleh burner didalam *secondary chamber* dalam temperatur tinggi yaitu sekitar 800°C-1000°C. Sehingga gas-gas pirolisa (Metana, Etana dan Hidrokarbon lainnya) terurai menjadi gas CO₂ dan H₂O.

Tabel 1. Kelebihan dan kelemahan penggunaan *incinerator* dibandingkan metode *landfill* dan kompos

Metode	Kelebihan	Kelemahan
Insinerasi	<ul style="list-style-type: none"> - Dapat memusnahkan banyak materi yang mengandung karbon dan pathogen - Reduksi volume mencapai 80-90% - Hasil pengolahan tidak dikenali sebagai bentuk aslinya - Panas yang dihasilkan dapat dimanfaatkan kembali untuk menghasilkan uap 	<ul style="list-style-type: none"> - Emisi udaranya menghasilkan bahan pencemar, terutama dioksin dan fluran yang oleh WHO dinyatakan karsinogenik - Perlu tenaga operator yang terampil - Resiko tinggi terhadap operator karena panas dan potensi kebakaran - Sulit menguji pathogen secara rutin serta fly-ash dari incinerator termasuk kategori limbah berbahaya

<i>Sanitary Landfill</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Proses pengolahan limbah membutuhkan waktu yang lebih cepat - Operasionalnya mudah 	<ul style="list-style-type: none"> - Biaya operasional dan pemeliharaan besar - Butuh operator yang terampil - Menimbulkan permasalahan baru di lingkungan (misal ; pembuangan sampah secara landfill menyebabkan pencemaran tanah,dll) - Menggunakan bahan kimia yang mungkin akan merusak lingkungan
Kompos	<ul style="list-style-type: none"> - Penggunaan lahan yang jauh lebih sempit dibandingkan landfill - Setelah selesai dikelola, hasilnya dapat digunakan untuk memupuki tanaman - Cara yang relatif murah untuk jumlah sampah yang besar akan tetapi dengan fluktuasi sampah yang kecil 	<ul style="list-style-type: none"> - Bahan yang tidak dapat diolah menjadi pupuk kompos, terpaksa harus menjadi sampah lagi - tidak semua jenis sampah dapat dikelola

Sumber: Putri Pujia, 2014

2.3 Prinsip Kerja *Incinerator*

Prinsip kerja *incinerator* adalah sebagai tempat pembakaran dengan suhu tinggi (>800°C) sehingga bahan yang dibakar tidak dapat didaur ulang lagi. Proses *incinerasi* digunakan untuk mereduksi sampah yang tergolong mudah terbakar (*combustible*) dan tidak boleh didaur ulang lagi karena berbagai alasan. Sasaran *incinerasi* adalah untuk mereduksi massa dan volume buangan, membunuh bakteri dan virus, mereduksi materi kimia toksik, serta memudahkan penanganan limbah selanjutnya. *Insinerasi* dapat mengurangi volume buangan padat domestik sampai 85 % - 95 % dan pengurangan berat sampai 70 % - 80 %.

Proses *insinerasi* berlangsung melalui tiga tahap, yaitu :

- Mula-mula membuat air dalam sampah menjadi uap air, hasilnya limbah menjadi kering yang akan siap terbakar pada suhu 105°C.

- Selanjutnya terjadi proses pirolisis, yaitu pembakaran tidak sempurna, dimana temperatur belum terlalu tinggi ($150^{\circ}\text{C} - 300^{\circ}\text{C}$)
- Fase berikutnya adalah pembakaran sempurna ($>800^{\circ}\text{C}$)

Agar terjadi proses optimal maka ada beberapa aspek yang harus diperhatikan dalam menjalankan suatu *incinerator*, antara lain :

- Aspek keterbakaran : menyangkut nilai kalor, kadar air, dan kadar abu dari buangan padat, khususnya sampah.
- Aspek keamanan : menyangkut titik nyala, tekanan uap, deteksi logam berat, dan operasional *incinerator*.
- Aspek pencegahan pencemaran udara : menyangkut penanganan debu terbang, gas toksik dan uap metalik

2.4 Limbah

Adanya berbagai sarana pelayanan kesehatan baik rumah sakit, klinik maupun puskesmas, akan menghasilkan limbah baik cair maupun padat. Limbah padat rumah sakit / puskesmas lebih dikenal dengan pengertian sampah rumah sakit. Limbah padat (sampah) adalah sesuatu yang tidak dipakai, tidak disenangi, atau sesuatu yang harus dibuang yang umumnya berasal dari kegiatan yang dilakukan oleh manusia, dan umumnya bersifat padat (KepMenKes R.I. No.1204/MENKES/SK/X/2004 dalam Dyah Pratiwi 2013).

Limbah padat layanan kesehatan adalah semua limbah yang berbentuk padat sebagai akibat kegiatan layanan kesehatan yang terdiri dari limbah medis dan non medis, yaitu (Pruss, 2005:3 dalam Dyah Pratiwi 2013):

- a. Limbah non medis adalah limbah padat yang dihasilkan dari kegiatan di RS di luar medis yang berasal dari dapur, perkantoran, taman dari halaman yang dapat dimanfaatkan kembali apabila ada teknologi.
- b. Limbah medis padat adalah limbah padat yang terdiri dari limbah infeksius, limbah patologi, limbah benda tajam, limbah farmasi, limbah sitotoksis, limbah container bertekanan, dan limbah dengan kandungan logam berat yang tinggi.

- c. Limbah infeksius adalah limbah yang terkontaminasi organisme patogen yang tidak secara rutin ada di lingkungan dan organisme tersebut dalam jumlah dan virulensi yang cukup untuk menularkan penyakit pada manusia yang rentan.
- d. Limbah sangat infeksius adalah limbah yang berasal dari pembiakan dan *stock* (sediaan) bahan sangat infeksius, otopsi, organ binatang percobaan, dan bahan lain yang diinokulasi, terinfeksi atau kontak dengan bahan yang sangat infeksius.

2.4.1 Limbah Medis

Limbah medis yaitu buangan dari kegiatan pelayanan yang tidak dipakai ataupun tidak berguna termasuk dari limbah pertamanan. Limbah medis cenderung bersifat infeksius dan kimia beracun yang dapat mempengaruhi kesehatan manusia, memperburuk kelestarian lingkungan hidup apabila tidak dikelola dengan baik. Limbah medis rumah sakit adalah semua limbah yang dihasilkan dari kegiatan rumah sakit dalam bentuk padat dan cair (KepMenkes RI No. 1428/Menkes/SK/XII/2006 dalam Dyah Pratiwi 2013).

Berdasarkan potensi bahaya yang dapat ditimbulkannya, oleh Departemen Kesehatan RI limbah medis telah digolongkan sebagai berikut (Adisamito, 2009:129-131 dalam Dyah Pratiwi 2013) :

- a. Limbah benda tajam, yaitu obyek atau alat yang memiliki sudut tajam, sisi, ujung atau bagian yang menonjol yang dapat memotong atau menusuk kulit, seperti jarum hipodermik, perlengkapan intravena, pipet pasteur, pecahan gelas dan pisau bedah.
- b. Limbah infeksius, yaitu limbah yang berkaitan dengan pasien yang memerlukan isolasi penyakit menular dan limbah laboratorium yang berkaitan dengan pemeriksaan mikrobiologi dari poliklinik dan ruang perawatan/isolasi penyakit menular.
- c. Limbah jaringan tubuh, yang meliputi organ, anggota badan, darah dan cairan tubuh. Biasanya dihasilkan pada saat pembedahan atau autopsi.
- d. Limbah sitotoksik, yaitu bahan yang terkontaminasi oleh obat sitotoksik selama peracikan, pengangkutan atau tindakan terapi sitotoksik.

- e. Limbah farmasi, yaitu terdiri dari obat-obatan kedaluwarsa, obat yang terbuang karena karena batch yang tidak memenuhi spesifikasi atau kemasan yang terkontaminasi, obat yang tidak diperlukan lagi atau limbah dari proses produksi obat.
- f. Limbah kimia, yaitu limbah yang dihasilkan dari penggunaan bahan kimia dalam tindakan medis, veterenary, laboratorium, proses sterilisasi atau riset. Dalam hal ini dibedakan dengan buangan kimia yang termasuk dalam limbah farmasi dan sitotoksik.
- g. Limbah radioaktif, yaitu bahan yang terkontaminasi dengan radio isotop yang berasal dari penggunaan medis atau riset radionuklida.

Tabel 2. Komposisi Kimia Limbah Infeksius

<i>Component</i>	<i>Percent by Weight (dry basis)</i>					
	<i>Carbon</i>	<i>Hydrogen</i>	<i>Oxygen</i>	<i>Nitrogen</i>	<i>Sulfur</i>	<i>Ash</i>
<i>Organic</i>						
<i>Food wastes</i>	48.0	6.4	37.6	2.6	0.4	5.0
<i>Paper</i>	43.5	6.0	44.0	0.3	0.2	6.0
<i>Cardboard</i>	44.0	5.9	44.6	0.3	0.2	5.0
<i>Plastics</i>	60.0	7.2	22.8	-	-	10.0
<i>Textiles</i>	55.0	6.6	31.2	4.6	0.15	2.5
<i>Rubber</i>	78.0	10.0	-	2.0	-	10.0
<i>Leather</i>	60.0	8.0	11.6	10.0	0.4	10.0
<i>Yard wastes</i>	47.8	6.0	38.0	3.4	0.3	4.5
<i>Wood</i>	49.5	6.0	42.7	0.2	0.1	1.5
<i>Inorganic</i>						
<i>Glass</i>	0.5	0.1	0.4	<0.1	-	98.9
<i>Metals</i>	4.5	0.6	4.3	<0.1	-	90.5
<i>Dirt, ash, etc.</i>	26.3	3.0	2.0	0.5	0.2	68.0

Sumber : <http://msw.cecs.ucf.edu/Exercise-Chemcomposition.pdf>

2.4.2 Limbah Non Medis

Selain limbah medis, Puskesmas juga menghasilkan limbah non-medis. Limbah non-medis adalah limbah domestik yang dihasilkan di sarana pelayanan kesehatan tersebut. Sebagian besar limbah ini merupakan limbah organik dan bukan merupakan limbah B-3, sehingga pengelolaannya dapat dilakukan bersama-sama dengan sampah kota yang ada. Jenis limbah non medis tersebut antara lain, limbah cair dari kegiatan laundry, limbah domestik cair dan sampah padat (Adisasmito, 2009:135 dalam Dyah Pratiwi 2013).

2.5 Standar Pengoperasian *Incinerator*

Incinerator tipe *batch* menerima satu kali pemasukan sampah ke ruang pembakaran dalam satu kali proses pembakaran. Laju pelepasan panas dikontrol dengan mengendalikan volume awal sampah dan udara yang tersedia untuk pembakaran. Ukuran ruang pembakaran dirancang untuk volume tertentu dan limbah dengan kandungan Btu tertentu pula. Jika *incinerator* diisi dengan limbah yang memiliki nilai Btu tinggi meskipun volume tidak melebihi kapasitas, kapasitas termal dari *incinerator* dapat terlampaui. Akibatnya, diperlukan pengurangan pemasukan volume sampah.

Berikut adalah prosedur pengoperasian *incinerator* :

1. Pembuangan abu

Awal pengoperasian *incinerator* dimulai dengan pembuangan abu yang dihasilkan dari siklus operasi sebelumnya. Berikut ini adalah pedoman untuk pengoperasian yang baik :

- a. Secara umum, *incinerator* membutuhkan waktu satu malam untuk proses pendinginan dan menghilangkan abu. Pendinginan dapat memakan waktu selama 8 jam (EPA, 1990).
- b. Operator harus membuka pintu pengeluaran abu dengan pelan untuk meminimalkan kemungkinan kerusakan pada pintu, segel gasket dan untuk mencegah abu berterbangan.
- c. Operator harus berhati-hati karena kemungkinan abu masih dalam kondisi yang panas pada titik tertentu serta danya benda tajam.
- d. Ruang abu dan pembakaran tidak boleh disemprot dengan air dingin karena pendinginan cepat dari semprotan air dapat mempengaruhi ruang refraktori.
- e. Sebuah sekop tumpul datar dan tidak tajam dan tahan api harus digunakan untuk pembersihan.
- f. Hindari mendorong abu ke udara terbuka.
- g. Tempatkan abu panas ke dalam wadah yang tidak mudah terbakar (logam). Basahi abu dengan air untuk mendinginkan dan mengurangi abu berterbangan.

- h. Setelah abu dibuang dan sebelum menutup pintu pengeluaran abu, operator harus memeriksa gasket seal pintu. Jika rusak lakukan pergantian.
- i. Untuk mencegah kerusakan pada segel pintu, operator harus menutup pintu pengeluaran abu dengan pelan dan tidak boleh *overtighten* klem pintu. *Champs* pintu yang *overtightened* dapat menyebabkan gasket seal menjadi permanen dan memungkinkan infiltrasi udara luar disekitar permukaan pintu.

2. Proses pemasukan sampah

Operator memiliki pilihan untuk memilih jenis sampah yang akan dimasukkan. Sifat sampah yang harus diperhatikan diantaranya : nilai kalor yang tinggi dapat melebihi kapasitas termal dari *incinerator*. Hasilnya adalah pembakaran suhu tinggi yang dapat merusak *incinerator* dan dapat menghasilkan emisi yang berlebihan. Demikian pula, sampah dengan kadar air yang sangat tinggi tidak akan memberikan masukan termal yang baik dan memerlukan penggunaan bahan bakar tambahan lebih dari biasanya.

3. Pembakaran sampah

Panas yang dihasilkan harus diperkirakan dengan tepat jika tidak dapat merusak *incinerator*.

4. Habis terbakar/*burndown*

Lamanya waktu yang dibutuhkan untuk sampah habis terbakar dipengaruhi oleh desain *incinerator*, karakteristik sampah, dan derajat kejenuhan yang diinginkan. Periode habis terbakar adalah 2 sampai 4 jam. Kualitas habis terbakar dapat dilakukan dengan memeriksa abu yang dihasilkan. Pemeriksaan abu adalah salah satu cara untuk mengevaluasi kinerja *incinerator*.

5. Pertimbangan khusus

Jika limbah patologis sedang dibakar, alat pembakar harus diatur agar sampah benar-benar terbakar. Untuk menghancurkan limbah patologis yang efisien, limbah harus langsung terkena api dari alat pembakar. Mengisi seluruh ruang pembakaran akan menghasilkan pembakaran yang tidak efisien. Jika limbah patologis yang harus dibakar dalam volume besar, *incinerator* harus didesain khusus untuk limbah patologis tersebut.

2.6 Bahan Bakar Gas

Bahan bakar gas merupakan bahan bakar yang sangat memuaskan sebab hanya memerlukan sedikit *handling* dan sistim *burner* nya sangat sederhana dan hampir bebas perawatan. Ditinjau dari sudut teknis dan ekonomis, bahan bakar diartikan sebagai bahan yang apabila dibakar (dipanaskan sampai mencapai temperature yang memungkinkan terjadinya reaksi kimia dengan oksidator) dapat meneruskan proses pembakaran tersebut dengan sendirinya, disertai dengan pengeluaran kalor. Bahan bakar dibakar dengan tujuan untuk memperoleh kalor tersebut, untuk digunakan baik secara langsung maupun tak langsung.

Bahan bakar gas, jika tersedia merupakan bahan bakar yang ideal untuk digunakan pada berbagai keperluan pembakaran Karena kemudahan dalam penanganannya, kandungan residu padat dapat diabaikan dan rendahnya kebutuhan udara lebih (*excess air*) sehingga dapat diperoleh efisiensi pemanfaatan yang tinggi.

Tabel 3. Sifat-Sifat Fisik dan Kimia Berbagai Bahan Bakar Gas

Bahan bakar gas	Massa jenis relatif	Nilai kalor yang lebih tinggi kkal/Nm ³	Perbandingan		
			udara/bahan bakar-m ³ udara terhadap m ³ bahan bakar	Suhu nyala api °C	Kecepatan nyala api m/s
Gas alam	0,6	9350	10	1954	0,290
Propan	1,52	22200	25	1967	0,460
Butan	1,96	28500	32	1973	0,870

Sumber : www.energyefficiencyasia.org

2.6.1 LPG

LPG terdiri dari campuran utama propan dan Butan dengan sedikit persentase hidrokarbon tidak jenuh (propilen dan butilene) dan beberapa fraksi C₂ yang lebih ringan dan C₅ yang lebih berat. Senyawa yang terdapat dalam LPG adalah propan (C₃H₈), Propilen (C₃H₆), normal dan iso-butan (C₄H₁₀) dan Butilen (C₄H₈). LPG merupakan campuran dari hidrokarbon tersebut yang berbentuk gas

pada tekanan atmosfer, namun dapat diembunkan menjadi bentuk cair pada suhu normal, dengan tekanan yang cukup besar. Walaupun digunakan sebagai gas, namun untuk kenyamanan dan kemudahannya, disimpan dan ditransport dalam bentuk cair dengan tekanan tertentu. LPG cair, jika menguap membentuk gas dengan volum sekitar 250 kali. Uap LPG lebih berat dari udara, butan beratnya sekitar dua kali berat udara dan propan sekitar satu setengah kali berat udara. Sehingga, uap dapat mengalir didekat permukaan tanah dan turun hingga ke tingkat yang paling rendah dari lingkungan dan dapat terbakar pada jarak tertentu dari sumber kebocoran. Pada udara yang tenang, uap akan tersebar secara perlahan. Lolosnya gas cair walaupun dalam jumlah sedikit, dapat meningkatkan campuran perbandingan volum uap/udara sehingga dapat menyebabkan bahaya. Untuk membantu pendeteksian kebocoran ke atmosfer, LPG biasanya ditambah bahan yang berbau. Harus tersedia ventilasi yang memadai didekat permukaan tanah pada tempat penyimpanan LPG. Karena alasan diatas, sebaiknya tidak menyimpan silinder LPG di gudang bawah tanah atau lantai bawah tanah yang tidak memiliki ventilasi udara.

2.7 Udara

2.7.1 Pengertian Udara

Udara merujuk kepada campuran gas yang terdapat pada permukaan bumi. Oksigen (O_2) merupakan salah satu elemen bumi paling umum yang jumlahnya mencapai 21% dari udara. Hampir 78% udara (tanpa adanya oksigen) merupakan nitrogen (N_2) dan sisanya merupakan . Nitrogen dianggap sebagai pengencer yang menurunkan suhu yang harus ada untuk mencapai oksigen yang dibutuhkan dalam pembakaran (wikipedia.co.id).

Udara teoritis adalah udara minimum yang dibutuhkan untuk pembakaran sempurna. Dalam prakteknya, kebutuhan udara pembakaran selalu lebih besar dari kebutuhan udara teoritis, dan disebut sebagai udara berlebih (*excess air*) (Muhammad Yusuf Firdaus, 2012).

2.7.2 Udara Sebagai Salah Satu Faktor Utama Pembakaran

Dalam pembakaran, ada pengertian udara primer yaitu udara yang dicampurkan dengan bahan bakar di dalam *burner* (sebelum pembakaran) dan udara sekunder yaitu udara yang dimasukkan dalam ruang pembakaran setelah *burner*, melalui ruang disekitar *burner* atau melalui tempat lain pada dinding dapur (Muhammad Yusuf Firdaus, 2012).

Dalam prakteknya, kebutuhan udara pembakaran selalu lebih besar dari kebutuhan udara teoritis, dan disebut sebagai udara berlebih (*excess air*). Besarnya jumlah udara yang harus disuplai ke dalam proses pembakaran dipengaruhi oleh jenis bahan bakar, ukuran partikel bahan bakar, dan teknik pembakarannya (Muhammad Yusuf Firdaus, 2012). Ketika diasumsi bahan bakar dibakar dengan udara teoritis, berarti proses pembakaran tersebut sempurna atau tepat secara kimiawi dan tidak ada atom-atom oksigen yang tidak tercampur hadir di dalam gas yang dihasilkan (Lee, Chun, 2001).

Stoikiometri merupakan salah satu metode yang paling banyak digunakan untuk menentukan rumus empirik senyawa yang belum diketahui. Kebanyakan digunakan untuk senyawa-senyawa yang mengandung karbon. Dalam analisis pembakaran, massa suatu senyawa yang telah diketahui dibakar dalam suatu aliran gas oksigen. Semua karbon di dalam sampel terkonversi menjadi karbon dioksida dan semua hidrogen terkonversi menjadi air (Lee, Chun, 2001).

Nitrogen mengurangi efisiensi pembakaran dengan cara menyerap panas dari pembakaran bahan bakar dan mengencerkan gas buang. Nitrogen juga mengurangi transfer panas pada permukaan alat penukar panas, juga meningkatkan volum hasil samping pembakaran, yang juga harus dialirkan melalui alat penukar panas sampai ke cerobong (energyefficiencyasia.org).

Nitrogen juga dapat bergabung dengan oksigen (terutama pada suhu nyala yang tinggi) untuk menghasilkan oksida nitrogen (NO_x), yang merupakan pencemar beracun. Karbon, hydrogen dan sulfur dalam bahan bakar bercampur dengan oksigendi udara, membentuk karbon dioksida (CO_2), uap air dan sulfur oksida (SO_2) (energyefficiencyasia.org).

2.7.3 Tekanan Udara

Tekanan udara adalah tenaga yang bekerja untuk menggerakkan massa udara dalam setiap satuan luas tertentu. Satuan yang digunakan adalah atmosfer (atm), millimeter kolom air raksa (mmHg) atau milibar (mbar). Tekanan sebesar 1 atm setara dengan tekanan yang diberikan oleh kolom air raksa setinggi 760 mm (Andwi Pangestu, 2013).

Hukum gas ideal menunjukkan hubungan antara empat ciri gas: massa, volume, tekanan dan temperatur. Untuk menghitung salah satu dari empat ciri ini, ciri yang lain harus diketahui. Rasio tekanan atau temperatur harus lebih besar ketika terjadi perubahan pada tekanan atau temperatur untuk meningkatkan volume. Sebaliknya, rasio tekanan atau temperatur harus lebih kecil daripada yang lain untuk menurunkan volume (Hougen, 1954).

Salah satu alat pengukur tekanan adalah *pressure gauge*. Tekanan gauge merujuk kepada tekanan sistem diatas tekanan atmosferik. Semua *pressure gauge* menunjukkan besarnya tekanan atmosferik. Untuk menentukan tekanan absolut yang harus digunakan dalam hukum gas ideal, tekanan atmosferik harus ditambahkan dalam *pressure gauge*. Tekanan atmosferik rata-rata pada level laut adalah 14,7 psi atau 29,92 in merkuri (Hougen, 1954).

2.7.4 Udara Berlebih (*excess air*)

Dalam proses pembakaran sulit untuk mendapatkan pencampuran yang memuaskan antara bahan bakar dengan udara pada proses pembakaran aktual . Udara perlu diberikan dalam jumlah berlebih untuk memastikan terjadinya pembakaran secara sempurna seluruh bahan bakar yang ada (Taufiq, 2008).

Untuk memastikan bahwa pembakaran terjadi secara sempurna, ruang bakar harus mendapatkan tambahan udara (*excess air*). Udara berlebih akan meningkatkan jumlah oksigen dan kemungkinan terbakarnya seluruh bahan bakar. Saat seluruh bahan bakar dan oksigen di udara mencapai titik kesetimbangan, pembakaran dapat dikatakan mencapai stoikiometri. Efisiensi pembakaran akan meningkat seiring dengan meningkatnya jumlah *excess air*, sampai panas hilang

dalam udara berlebih lebih besar daripada panas yang dihasilkan oleh pembakaran yang lebih efisien (engineeringtoolbox.com).

Secara teoritis, oksigen dan karbon monoksida tidak dapat muncul secara serempak dalam gas buang tetapi biasanya keduanya muncul dalam proses pembakaran actual disebabkan oleh pencampuran tak sempurna. Apabila angka perbandingan antara udara dan bahan bakar actual diketahui, maka persentase kelebihan udara dapat dihitung. Persentase kelebihan udara ditentukan melalui persamaan:

$$\% \text{excess air} = \frac{(\text{mol udara aktual}) - (\text{mol udara teoritis})}{(\text{mol udara teoritis})} \times 100\%$$

(Sumber: Hanyak, Jr., Michael E., 2010)

Berikut ini adalah kisaran pemakaian udara berlebih untuk beberapa bahan bakar:

- 3 – 15% untuk bahan bakar gas
- 5 - 20% untuk bahan bakar minyak
- 15 - 60% untuk batubara

Produk pembakaran adalah energi panas, karbon dioksida, uap air, nitrogen dan gas lainnya. Dalam teori ada jumlah spesifik oksigen yang dibutuhkan untuk bereaksi dengan bahan bakar secara sempurna (engineeringtoolbox.com). Oksigen teoritis adalah laju alir mol (untuk sistem *batch*) atau molar O_2 (untuk sistem kontinyu) yang dibutuhkan agar terjadi pembakaran sempurna pada bahan bakar, dengan asumsi bahwa semua karbon pada bahan bakar teroksidasi menjadi CO_2 , semua hidrogen teroksidasi menjadi H_2O dan sulfur teroksidasi menjadi SO (Hanyak, Jr., Michael E., 2010). Penambahan *excess-air* dapat meningkatkan aliran udara turbulen sehingga akan meningkatkan pencampuran udara dan bahan bakar di ruang bakar mengakibatkan pembakaran akan sempurna. *Excess-air* akan mempengaruhi jumlah gas CO pada gas buang dan kehilangan panas (*heat losses*) pembakaran serta akan mempengaruhi efisiensi pembakaran (Punto Ari Prabawa, 2010).

2.8 Proses Pembakaran

Reaksi pembakaran secara umum terjadi melalui 2 cara, yaitu pembakaran sempurna dan pembakaran habis. Pembakaran sempurna adalah proses pembakaran yang terjadi jika semua karbon bereaksi dengan oksigen menghasilkan CO₂, sedangkan pembakaran habis adalah proses pembakaran yang terjadi jika bahan bakar terbakar habis adalah proses pembakaran yang tidak semuanya menjadi CO₂ (Abdullah et, al., 1998 dalam Arif Budiman, 2001)

Menurut Culp (1991 dalam Arif Budiman, 2001) proses pembakaran actual dipengaruhi oleh 5 faktor, yaitu :

- Pencampuran udara dan bahan dengan baik
- Kebutuhan udara untuk proses pembakaran
- Suhu pembakaran
- Lamanya waktu pembakaran yang berhubungan dengan laju pembakaran
- Berat jenis bahan yang akan dibakar

Pencampuran udara dan bahan bakar yang baik dalam pembakaran actual biasanya tidak dapat dicapai tetapi didekati melalui penambahan *excess* udara. Penambahan *excess* udara harus baik dengan nilai minimum kare apabila terlalu banyak dapat meningkatkan kehilangan energy dalam pembakaran dan meningkatnya emisi NO_x.

Proses pembakaran sampah pada rumah tangga berlangsung secara bertahap. Tahap awal terjadi penguapan kandungan air sampah yang belum terbakar menggunakan panas dari bahan terbakar yang berada di sekelilingnya atau menggunakan energi panas yang ditambahkan dari luar. Pada saat pemanasan sampah terjadi pelepasan karbon atau bahan volatile yang terkonversi menjadi gas yang mudah terbakar, proses ini disebut gasifikasi. Gas ini selanjutnya bercampur dengan oksigen yang dapat mengalami reaksi oksidasi. Kondisi ini apabila menghasilkan temperature cukup tinggi dan berlangsung lama dapat terkonversi secara sempurna (*complete combustion*) menghasilkan uap air dan CO₂ yang dilepaskan ke udara.

Kondisi sebaliknya dapat terjadi yaitu apabila temperatur pembakaran rendah dan waktu tinggal pada ruang bakar cepat terjadi pembakaran yang tidak sempurna (*incomplete combustion*) yang dapat menghasilkan asap (Lee & Lin, 2007 dalam subagiyo ddk 2013). Dampak lain dari pembakaran tidak sempurna adalah terbentuknya polutan lain yang semula tidak terdapat dalam sampah karena terjadi reaksisintesa yang disebut *denovo* menghasilkan dioksidan furan. Tingkat kesempurnaan pembakaran di pengaruhi oleh beberapa variable berikut :

a. Temperatur

Temperatur pembakaran merupakan fungsi nilai bakar (*heating value*) sampah dan bahan bakar tambahan dari luar, rancangan alat pembakar (*incinerator*), supply udara dan control pembakaran. Pembakaran sempurna memerlukan temperature tinggi, secara umum temperature lebih tinggi dari 650°C dan waktu tinggal 1-2 detik dapat menghasilkan pembakaran sempurna pada makanan dan sampah rumah tangga. Temperatur lebih tinggi sekitar 1000°C diperlukan untuk membakar campuran sampah yang mengandung bahan berbahaya (*hazardous*) seperti sampah medis dengan waktu tinggal minimal 1detik dapat menghasilkan polutan seperti dioksisn, furan, asap dan abu minimal.

b. Waktu Tinggal

Pembakaran sempurna membutuhkan waktu tinggal yang cukup yaitu waktu yang dibutuhkan untuk menjamin terjadinya percampuran yang sempurna antara udara dan bahan bakar agar dapat bereaksi secara sempurna. Pembakaran pada temperatur rendah, sampah dengan nilai panas rendah dan turbulensi campuran gas yang rendah memerlukan waktu tinggal yang lebih lama untuk menghasilkan pembakaran yang sempurna.

c. Turbulensi

Turbulensi pencampuran gas yang terbakar dan udara diperlukan untuk menjamin terjadinya kontak yang cukup antara bahan bakar dan udara. Hal ini dapat menghasilkan temperatur yang tinggi sehingga menyebabkan pembakaran sempurna. Tingkat pencampuran tergantung dari rancangan ruang bakar insinerator dan sistem injeksi udara. Sistem pembakaran dengan

sirkulasi udara alami pada sistem pembakaran terbuka tidak dapat menghasilkan pencampuran yang baik. Demikian juga tumpukan sampah yang terlalu tinggi dapat mengganggu turbulensi pencampuran udara dan gas yang mudah terbakar karena tersumbatnya rongga jalur aliran kedua bahan ini. Rancangan insinerator yang dapat menghasilkan pembakaran sempurna menggunakan system sirkulasi paksa (*forced circulation*) untuk memperoleh turbulensi pencampuran.

d. Komposisi Sampah

Karakteristik sampah seperti nilai panas, kandungan air dan sifat kimia (kandungan C, H, O, N, S dan Cl) sampah berpengaruh terhadap proses pembakaran dan jenis polutan pada gas buang dan abu. Semakin tinggi temperatur, waktu tinggal dan derajat pencampuran gas dan udara semakin mendekati pembakaran sempurna dan semakin kecil pengaruh karakteristik sampah terhadap tingkat kesempurnaan pembakaran.

Beberapa hal yang terjadi pada proses pembakaran (Darmansyah Dalimunthe, 2006):

a. Pembakaran dengan udara kurang

Pada proses ini terjadi perpindahan panas berkurang dan panas hilang karena bahan bakar berlebih serta ada bahan bakar yang tak terbakar disamping terdapat hasil pembakaran, seperti CO, CO₂, uap air, O₂, dan N₂.

b. Pembakaran dengan udara berlebih

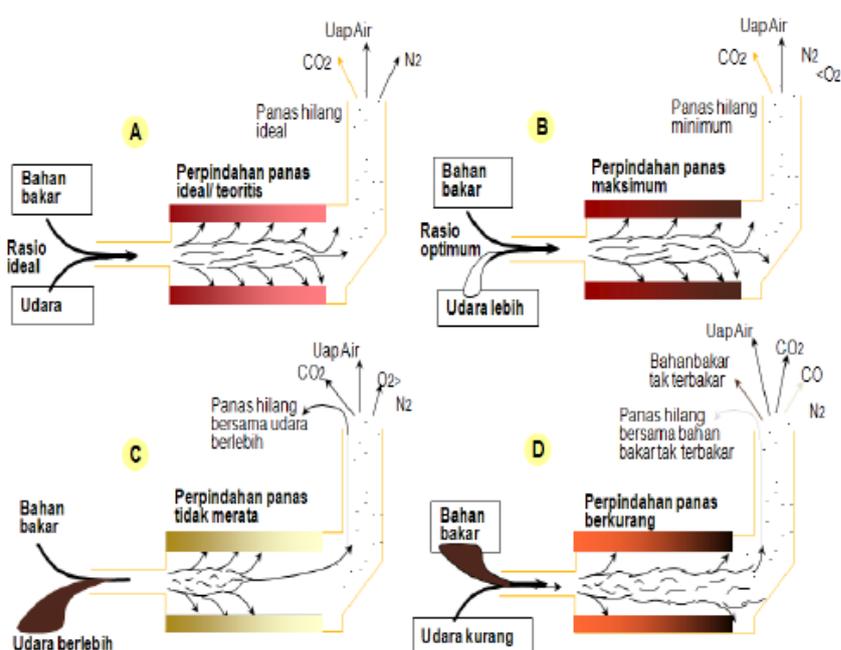
Pada proses ini terjadi perpindahan panas berkurang dan panas hilang karena udara berlebih serta hasil pembakaran, seperti CO₂, uap air, O₂ dan N₂.

c. Pembakaran dengan udara optimum

Pada proses ini terjadi perpindahan panas yang maksimum dan panas yang hilang minimum, serta terdapatnya hasil pembakaran, seperti CO₂, uap air, dan N₂.

Pada proses pembakaran (*incineration*) limbah B3 (bahan berbahaya dan beracun) kebanyakan terdiri dari karbon, hidrogen dan oksigen. Dapat juga mengandung halogen, sulfur, nitrogen dan logam berat. Hadirnya elemen lain

dalam jumlah kecil tidak mengganggu proses oksidasi limbah B3 (bahan berbahaya dan beracun). Struktur molekul umumnya menentukan bahaya dari suatu zat organik terhadap kesehatan manusia dan lingkungan. Bila molekul limbah dapat dihancurkan dan diubah menjadi karbon dioksida (CO_2), air (H_2O) dan senyawa anorganik, tingkat senyawa organik akan berkurang. Untuk penghancuran dengan panas merupakan salah satu teknik untuk mengolah limbah B3 (bahan berbahaya dan beracun).



Gambar 8. Profil Pembakaran Bahan Bakar

Sumber : <http://www.iesr.or.id>

2.8.1 Panas pembakaran

Energi panas yang dihasilkan oleh suatu proses pembakaran dapat diduga besarnya melalui beberapa pendekatan diantaranya melalui pendekatan pancaran panas dari gas hasil pembakaran dan pendekatan jumlah nilai kalor yang dikandung oleh bahan bakar per massa bahan bakar.

- Pendekatan jumlah energi panas pembakaran berdasarkan pancaran gas hasil pembakaran didekati melalui sifat radiasi gas yang menyerap. Menurut McCabe et, al. (1999) dalam Arif Budiman (2001) gas-gas hasil pembakaran memiliki kemampuan untuk memancarkan atau menyerap panas.

- Pendekatan energi panas yang dihasilkan oleh suatu proses pembakaran adalah melalui nilai kalor yang dikandung oleh bahan bakar.

2.9 Kajian Termodinamika Pembakaran

2.9.1 Nilai Kalor

Nilai kalor menunjukkan kalor yang berpindah bila hasil pembakaran lengkap suatu bahan bakar didinginkan sampai suhu semula udara dan bahan bakar. Harga yang biasa digunakan dalam penetapan nilai kalor adalah kalor kotor (gross heating value) atau yang lebih dikenal dengan nilai kalor atas (higher heating value). HHV adalah kalor total yang dibebaskan dalam pembakaran yang terukur dari waktu awal pembakaran hingga mencapai suhu produk pembakaran sedangkan nilai kalor bersih (net heating value) atau nilai kalor bawah (lower heating value) adalah kalor yang dihasilkan bahan bakar manakala semua air dalam produk pembakaran tersisa sebagai uap air.

2.9.2 Pembakaran Stoikiometrik

Pembakaran stoikiometrik adalah pembakaran dimana semua atom-atom karbon akan menghasilkan gas karbon dioksida (CO_2) dan atom hidrogen menghasilkan uap air (H_2O) sedangkan jumlah udara minimum yang memberikan oksigen yang cukup untuk oksida lengkap dari semua karbon, hidrogen, dan elemen – elemen yang dapat terbakar di dalam bahan bakar dinamakan udara stoikiometrik atau udara teoritis. Sehingga pembakaran stoikiometrik jika berlaku pembakaran lengkap dengan kebutuhan udara hanya sebesar udara teoritis.

Dari keseimbangan energi, semua energi yang dihasilkan dari proses pembakaran dapat ditransfer melalui ruang bakar. Tetapi dalam kenyataannya tidak semua energi reaksi kimia dapat diperoleh, hal ini disebabkan faktor-faktor, seperti ketidak homogenya bahan bakar maupun pembakaran tidak lengkap. Oleh karena itu timbul satu sifat yang disebut efisiensi ruang bakar, dan dinyatakan dalam persamaan:

$$\text{Efisiensi Ruang Bakar} = \frac{HHV - \Sigma \text{Losses}}{HHV}$$

Pembakaran *stoichiometri* adalah pembakaran dimana bahan bakar terbakar sempurna dengan jumlah udara teori, yaitu apabila :

- b. Tidak ada bahan bakar yang belum terbakar (semua unsur karbon C menjadi karbondioksida CO_2 , dan semua unsur hidrogen H menjadi air H_2O)
- c. Tidak ada oksigen di dalam produk

Penyebab proses pembakaran menjadi tak sempurna, dimana ditandai dengan terbentuknya C, H_2 , CO, OH atau yang lain dalam produk pembakaran :

- a. Kekurangan oksigen (O_2)
- b. Kurangnya kualitas campuran
- c. Terjadi dissosiasi (peruraian gas produk karena suhu tinggi)

Pembakaran yang optimum dapat terjadi ketika jumlah udara yang sesungguhnya harus lebih besar daripada yang dibutuhkan secara teoritis. Analisis kimia gas-gas merupakan metode obyektif yang dapat membantu untuk mengontrol udara yang lebih baik dengan mengukur CO_2 , atau O_2 , dalam gas buang menggunakan peralatan pencatat kontinyu atau peralatan *Orsat*. Pengukuran kandungan gas CO_2 , dalam gas buang dapat digunakan untuk menghitung udara berlebih (*excess-air*). Sejumlah tertentu *excess-air* diperlukan untuk pembakaran sempurna bahan bakar minyak, jika terlalu banyak *excess-air* mengakibatkan pembakaran yang tidak sempurna (www.energyefficiencyasia.org)

Penambahan *excess-air* dapat meningkatkan aliran udara turbulen sehingga akan meningkatkan pencampuran udara dan bahan bakar di ruang bakar mengakibatkan pembakaran akan sempurna. *Excess-air* akan mempengaruhi jumlah gas CO pada gas buang dan kehilangan panas (*heat losses*) pembakaran serta akan mempengaruhi efisiensi pembakaran (www.einstrumentgroup.com).

2.10 Temperatur Nyala Api (*Flame Temperatur*)

Temperature nyala *Flame Temperatur* adalah suhu maksimum nyala bahan bakar yang terjadi apabila tidak ada kebocoran panas ke sekelilingnya. Suhu nyala adiabatic diperlukan untuk mengetahui berapa besar panas yang terjadi ketika bahan bakar tersebut dibakar. Hal ini merupakan salah satu parameter

karakteristik termal dari bahan bakar. Perhitungan suhu nyala adiabatik didasarkan atas persentase massa dari kandungan carbon, hydrogen, oksigen dan nitrogen di dalam bahan bakar. Dalam pembakaran, semua kalor yang terkandung di dalam bahan bakar menjadi kalor produk dan kalor sensibel.

Terdapat dua klasifikasi utama dari nyala api yaitu nyala api *premix* (*premixed flame*) dan nyala api difusi (*diffusion flame*). Nyala api *premix* (*premixed flame*) adalah jenis dimana bahan bakar dan udara bercampur sebelum terjadinya proses pembakaran. Nyala api difusi (*diffusion flame*) timbul sewaktu udara berdifusi ke bahan bakar di dalam nyala api (*flame*) (Rachmat, HF, 2008).

2.11 Persamaan Gas Ideal

Untuk melakukan pengukuran terhadap volume gas, diperlukan suatu keadaan standar untuk digunakan sebagai titik acuan. Keadaan ini yang juga dikenal sebagai STP (*Standart Temperature and Pressure*) yaitu keadaan dimana gas mempunyai tekanan sebesar 1 atm (760 mmHg) dan suhu °C (273,15 K). satu mol gas ideal yaitu gas yang memenuhi ketentuan semua hokum-hukum gas akan mempunyai volume sebanyak 22,414 liter pada keadaan standar ini.

Syarat berlakunya hokum boyle adalah bila gas berada dalam keadaan idean (gas sempurna), yaitu gas yang terdiri dari satu atau lebih atom-atom dan dianggap identik satu sama lain. Setiap molekul tersebut bergerak secara acak, bebas dan merata serta memenuhi persamaan gerak newton. Berikut persamaan gas ideal :

$$P \cdot V = n R T$$

Keterangan :

P = tekanan gas

V = volume gas

n = jumlah mol gas

T = temperature mutlak (Kelvin)

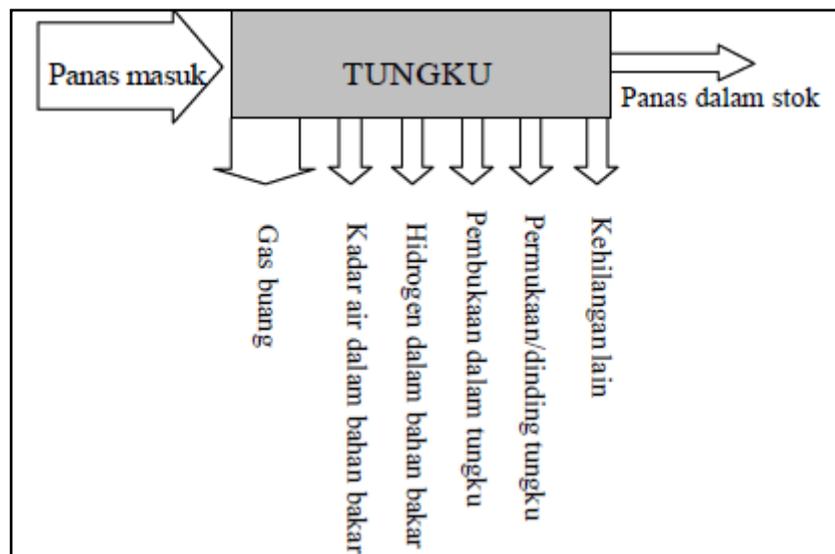
R = konstanta gas universal (0,082 liter.atm.mol⁻¹.K⁻¹)

2.12 Pengkajian Terhadap Tungku

Bagian ini menjelaskan berbagai metoda dan teknik yang digunakan untuk menentukan jumlah kehilangan dari tungku dan metoda untuk melakukan pengkajian kinerja tungku.

2.12.1 Kehilangan panas yang mempengaruhi kinerja tungku

Idealnya, seluruh panas yang dimasukkan ke tungku harus digunakan untuk memanaskan muatan atau stok. Namun demikian dalam prakteknya banyak panas yang hilang dalam beberapa cara sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 9.



Gambar 9. Kehilangan Panas dalam Tungku

Kehilangan panas dalam tungku tersebut meliputi (BEE, 2005 and US DOE, 2004):

- a. ***Kehilangan gas buang***: merupakan bagian dari panas yang tinggal dalam gas pembakaran dibagian dalam tungku. Kehilangan ini juga dikenal dengan kehilangan limbah gas atau kehilangan cerobong.
- b. ***Kehilangan dari kadar air dalam bahan bakar***: bahan bakar yang biasanya mengandung kadar air dan panas digunakan untuk menguapkan kadar air dibagian dalam tungku.
- c. ***Kehilangan dikarenakan hidrogen dalam bahan bakar*** yang mengakibatkan terjadinya pembentukan air

- d. Kehilangan melalui pembukaan dalam tungku:** kehilangan radiasi terjadi bilamana terdapat bukaan dalam penutup tungku dan kehilangan tersebut dapat menjadi cukup berarti terutama untuk tungku yang beroperasi pada suhu diatas 540°C. Kehilangan yang kedua adalah melalui penyusupan udara sebab *draft* tungku/ cerobong menyebabkan tekanan negatif dibagian dalam tungku, menarik udara melalui kebocoran atau retakan atau ketika pintu tungku terbuka.
- e. Kehilangan dinding tungku/permukaan,** juga disebut kehilangan dinding: sementara suhu dibagiandalam tungku cukup tinggi, panas dihantarkan melalui atap, lantai dan dinding dan dipancarkan ke udara ambien begitu mencapai kulit atau permukaan tungku.
- f. Kehilangan lainnya:** terdapat beberapa cara lain dimana panas hilang dari tungku, walupun menentukan jumlah tersebut seringkali sulit. Beberapa diantaranya adalah:
- Kehilangan panas tersimpan: bila tungku mulai dinyalakan maka struktur dan isolasi tungku juga dipanaskan, dan panas ini hanya akan meninggalkan struktur lagi jika tungku dimatikan. Oleh karena itu kehilangan panas jenis ini akan meningkat dengan jumlah waktu tungku dihidup-matikan.
 - Kehilangan selama penanganan bahan: peralatan yang digunakan untuk memindahkan stok melalui tungku, seperti *belt conveyor*, balok berjalan, *bogies*, dll. juga menyerap panas. Setiap kali peralatan meninggalkan tungku mereka akan kehilangan panasnya, oleh karena itu kehilangan panas meningkat dengan sejumlah peralatan dan frekuensi dimana mereka masuk dan keluar tungku
 - Kehilangan panas media pendingin: air dan udara digunakan untuk mendinginkan peralatan, *rolls*, bantalan dan *rolls*, dan panas hilang karena media tersebut menyerap panas.
 - Kehilangan dari pembakaran yang tidak sempurna: panas hilang jika pembakaranberlangsung tidak sempurna sebab bahan bakar atau partikel

yang tidak terbakar menyerap panas akan tetapi panas ini tidak disimpan untuk digunakan

- Kehilangan dikarenakan terjadinya pembentukan kerak.

2.13 Perpindahan panas

Perpindahan panas adalah ilmu yang mempelajari perpindahan energi karena perbedaan temperatur diantara benda atau material. Di samping itu, perpindahan panas juga meramalkan laju perpindahan panas yang terjadi pada kondisi tertentu.

Konsep temperatur ini untuk aliran fluida yang tidak terdapat aliran massa atau aliran arus. Disini perpindahan paans terjadi karena adanya perbedaan temperatur atau adanya gradient panas.

Mekanisme perpindahan panas terbagi menjadi tiga yaitu :

1. Perpindahan panas konduksi

Adanya gradient temperatur akan terjadi perpindahan panas. Dalam benda padat perpindahan panas timbul karena gerakan antar atom pada temperatur yang tinggi, sehingga atom-atom tersebut dapat memindahkan panas. Didalam cairan atau gas, panas dihantar oleh tumbukan antar molekul.

Persamaan dasar konduksi :

$$q = -k A \frac{dT}{dx}$$

keterangan :

q = laju perpindahan panas

k = konduktivitas termal

A = luas penampang dT

Diintegalkan menjadi

$$\frac{q}{A} = -k \frac{T_1 - T_2}{X_2 - X_1}$$

Dimana :

$\Delta T = T_1 - T_2$ = perumusan temperatur yang melintasi bahan

$\Delta X = X_2 - X_1$ = tebal bahan

Sistem radial silinder

Persamaan untuk sistem radial silinder yaitu

$$q = -k A \frac{dT}{dr} 2\pi r L$$

dimana :

$$2\pi r L = A = \text{luas silinder}$$

$$dr = dn$$

2. Perpindahan panas konveksi

Perpindahan panas terjadi secara konveksi dari pelat ke sekeliling atau sebaliknya. Perpindahan panas konveksi dibedakan menjadi dua yaitu konveksi bebas dan konveksi paksa.

Persamaan dasar konveksi

$$T_w > T_\infty$$

$$q = h A (T_w - T_\infty)$$

keterangan :

q = laju perpindahan panas

h = koefisien perpindahan panas konveksi

A = luas permukaan

T_w = temperatur dinding

T_∞ = temperatur sekeliling

Panas yang dipindahkan pada peristiwa konveksi dapat panas laten dan panas sensible. Panas laten adalah panas yang menyertai proses perubahan fasa, sedang panas sensibel adalah panas yang berkaitan dengan kenaikan atau penurunan temperatur tanpa perubahan fasa.

3. Perpindahan panas radiasi

Perpindahan panas oleh perjalanan foton yang tak terorganisasi. Setiap benda terus-menerus memancarkan foton secara serampangan di dalam arah, waktu, dan energi netto yang dipindahkan oleh foton tersebut, diperhitungkan sebagai panas.

Persamaan dasar radiasi

$$q = \alpha A (T_1^4 - T_2^4)$$

keterangan :

q = laju perpindahan panas

A = luas permukaan

α = tetapan Stefan Boltzman

$$= 5,669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$$

$$= 0,1714 \times 110^{-8} \text{ btu/jam ft}^2 \text{ R}^4$$

T_1, T_2 = temperatur permukaan

(Sumber : Perpindahan Panas, Sri Wuryani)

2.14 Standar Baku Mutu Emisi Udara

Keputusan Bapedal No 03 tahun 1995. Peraturan tersebut mengatur tentang kualitas *incinerator* dan emisi yang dikeluarkannya. *Incinerator* yang diperbolehkan untuk digunakan sebagai penghancur limbah B3 harus memiliki efisiensi pembakaran dan efisiensi penghancuran / penghilangan (*Destruction Reduction Efisience*) yang tinggi.

Tabel 4. Baku Mutu DRE untuk *Incinerator*

No	Parameter	Baku Mutu DRE
1	POHCs	99.99%
2	Polychlorinated biphenil (PCBs)	99.9999%
3	Polychlorinated dibenzofuran (PCDFs)	99.9999%
4	Polychlorinated dibenzo-p-dioksin	99.9999%

Sumber : Keputusan Kepala BAPEDAL Nomor : 03/BAPEDAL/09/1995 Tentang Persyaratan Teknis Pengolahan Limbah Berbahaya dan beracun (Tabel 2)

Disamping itu, persyaratan lain yang harus dipenuhi dalam menjalankan *incinerator* adalah emisi udara yang dikeluarkannya harus sesuai dengan baku mutu emisi untuk *incinerator*.

Tabel 5. Baku Mutu Emisi Udara untuk *Incinerator*

No	Parameter	Kadar Maksimum (mg/Nm ²)
1	Partikel	50
2	Sulfur dioksida (SO ₂)	250
3	Nitrogen dioksida (NO ₂)	300
4	Hidrogen Fluorida (HF)	10
5	Karbon Monoksida (CO)	100
6	Hidrogen Chlorida (HCl)	70
7	Total Hidrocarbon (sbg CH ₄)	35
8	Arsen (As)	1
9	Kadmium (Cd)	0.2
10	Kromium (Cr)	1
11	Timbal (Pb)	5
12	Merkuri (Hg)	0.2
13	Talium (Tl)	0.2
14	Opasitas	10%

Sumber : Keputusan Kepala BAPEDAL Nomor : 03/BAPEDAL/09/1995 Tentang Persyaratan Teknis Pengolahan Limbah Berbahaya dan beracun (Tabel 2)