

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 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 adalah hasil buangan industri berupa padatan, lumpur, bubur yang berasal dari sisa proses pengolahan (Suparni Setyowati, 2009).

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 *pathogen* 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*.

Pengolahan limbah padat dapat dilakukan dengan berbagai cara yang dapat menjadikan limbah tersebut tidak berdampak buruk bagi lingkungan ataupun kesehatan. Ada tiga metode yang dikenal dalam pengolahan limbah padat, yaitu metode *sanitary landfill*, kompos dan *insinerasi*.

- a. *Sanitary landfill* merupakan proses pemusnahan sampah dengan cara membuang dan menumpuk sampah ke suatu lokasi yang cekung, memadatkan sampah tersebut kemudian menutupnya dengan tanah.
- b. Pengomposan adalah *dekomposisi* biologi dan *stabilisasi substrak organik* dibawah kondisi yang sesuai dengan perkembangan suhu thermopilik dari hasil produk biologi, hasil akhirnya berupa kompos yang stabil, bebas penyakit dan gulma serta dapat memberikan keuntungan dilahan (Houg, 1993).
- c. *Insinerasi* merupakan proses pengolahan limbah padat dengan cara pembakaran pada temperatur lebih dari 800°C untuk mereduksi sampah mudah terbakar yang sudah tidak dapat didaur ulang lagi, membunuh bakteri, virus dan kimia toksik. Pada prinsipnya dalam proses pemusnahan sampah di insinerator adalah pembakaran yang mencapai 600-1000°C agar kuman penyakit yang ada disampah medis tersebut mati. Hal ini dikarenakan sampah yang ada bisa menjadi sumber penularan *reservoir* maupun *breeding site* bagi kuman penyakit. Namun, ada beberapa dibalik penggunaan insinerator, ada beberapa kelemahan dan kelebihan *incinerator* dibanding metode *landfill* dan kompos. Untuk lebih jelas mengenai kelebihan dan kelemahan *incinerator* dapat dilihat pada tabel 1.

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 <i>pathogen</i> - 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 <i>dioksin</i> dan <i>fluran</i> yang oleh WHO dinyatakan <i>karsinogenik</i> - Perlu tenaga operator yang terampil - Resiko tinggi terhadap operator karena panas dan potensi kebakaran - Sulit menguji pathogen secara rutin serta <i>fly-ash</i> dari <i>incinerator</i> termasuk kategori limbah berbahaya
<i>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 <i>landfill</i> 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 <i>landfill</i> - 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

2.2 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*.

Adapun komposisi limbah medis antara lain terdiri dari 80% limbah *non infeksius*, 15% limbah *patologi & infeksius*, 1% limbah benda tajam, 3% limbah kimia & farmasi, >1% tabung & termometer pecah (Ditjen PP & PL, 2011). Komposisi limbah medis didominasi oleh bahan plastik, untuk lebih jelas mengenai komposisi limbah dapat dilihat pada tabel 2.

Tabel 2. Komposisi kimia limbah

Komponen	Persen berat (dry basis)					
	C	H	O	N	S	Abu
Organik						
- Plastik	60	7,2	22,8	-	-	10
- Tekstil	55	6,6	31,2	4,6	0,15	2,5
- Karet	78	10	-	2	-	10
- Kertas	43,5	43,5	44	0,3	0,2	6
Inorganik						
- Gelas/kaca	0,5	0,1	0,4	<0,1	-	98,9
- Metal	4,5	0,6	4,3	<0,1	-	90,5

Sumber : <http://msw.cecs.ucf.edu/exercise/chemcomposition.pdf>

2.3 Insinerator

2.3.1 Pengertian Insinerator

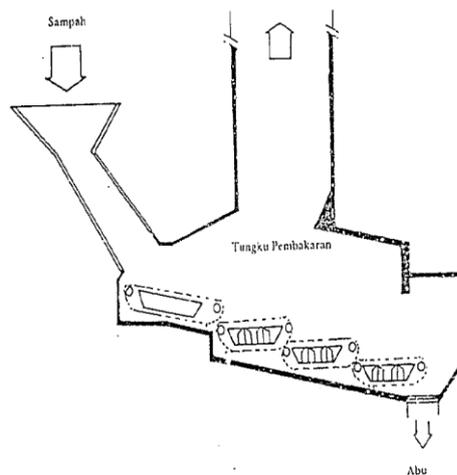
Incinerator adalah tungku pembakaran untuk mengolah limbah padat, yang mengkonversi materi padat (sampah) menjadi materi gas, dan abu, (*bottom ash* dan *fly ash*). *Incinerator* merupakan suatu alat penghancur atau pemusnah limbah organik melalui pembakaran dalam suatu sistem yang terkontrol dan terisolir 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.

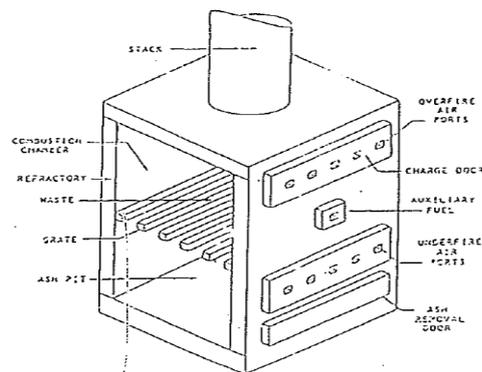
2.3.2 Sejarah Perkembangan Insinerator

Percobaan pembakaran menggunakan ruang bakar pertama kali digunakan di Inggris bagian utara pada tahun 1870-an. Proses insinerasi ini dapat mereduksi volume atau berat maksimum sampah sehingga mampu mengurangi volume sampah. Namun, karena polusi udara yang tidak bisa dikontrol sehingga pada tahun 1960-an penggunaan insinerator di Amerika dihentikan karena emisi partikulat yang dihasilkannya, biaya operasi yang mahal dan menurunnya praktek kompos dan daur ulang. (*United Nations Environment Programme, 1994*).

Pada tahun 1983, insinerator mulai dikembangkan oleh Hadiwiyoto yang merancang alat pembakar sampah berdasarkan metode pembakaran yang dibagi dalam dua tipe, yaitu tipe *batch* dan tipe *kontinyu*. Pada alat insinerator tipe kontinyu, sampah dimasukkan secara terus-menerus dengan debit tetap (gambar alat insinerator tipe *kontinyu* disajikan pada Gambar 1) sedangkan pada alat insinerator tipe *batch*, sampah dimasukkan sampai mencapai batas maksimum kemudian dibakar bersamaan (gambar alat insinerator tipe *batch* disajikan pada Gambar 2).

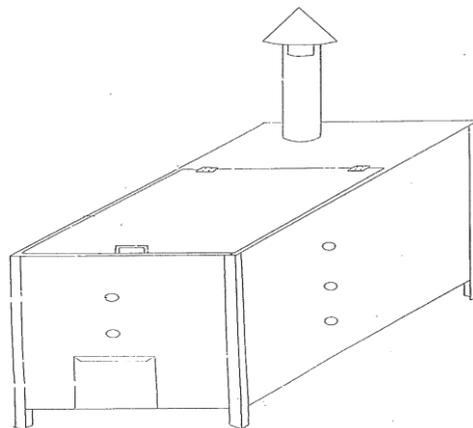


Gambar 1. Insinerator Sampah Tipe *Kontinyu*
Sumber: Arif Budiman, 2001



Gambar 2. Insinerator Sampah Tipe *Batch*
Sumber: Arif Budiman, 2001

Tahun 2001 Susanto merancang *incinerator* tipe batch yang terdiri dari 6 bagian utama yaitu ruang pembakaran, kasa penyulut api, ruang pengendapan bahan padat (hasil pembakaran), serobong asap, lubang pemasukan udara dan system pindah panas. Gambar pictorial dari alat ini dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Gambar Piktorial *Incinerator* Tipe Batch
Sumber: Susanto, 2001

Saat ini teknologi insinerator sudah sangat berkembang. Incinerator modern yang dimiliki beberapa Negara saat ini sudah dilengkapi dengan peralatan pembersih gas buang. Penelitian terakhir menjelaskan tentang alat insinerator dilengkapi dengan *water spray* yang berfungsi sebagai pembersih gas buang.

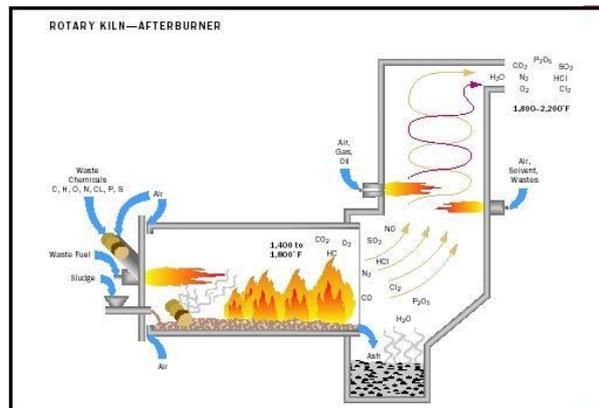
2.3.3 Jenis-Jenis Incinerator

Jenis insinerator yang digunakan untuk membakar limbah padat B3 ialah *rotary kiln*, *multiple hearth*, dan *fluidized bed* (Hans Christian, 2008).

a. *Incinerator Rotary Kiln*

Rotary kiln incinerator merupakan insinerator dengan kerangka silindris yang dilapisi bahan tahan api yang terpasang pada sudut kemiringan yang rendah. Rotasi dan sudut kemiringan dari tanur (*kiln*) menyebabkan Bergeraknya limbah melalui tanur sambil juga untuk meningkatkan pencampuran limbah tersebut dengan udara. Rotary kiln secara normal memerlukan suatu ruang bakar sekunder (*after burner*) untuk memastikan hancurnya unsur-unsur yang berbahaya secara menyeluruh. Ruang utama berfungsi untuk terjadinya pirolisis atau pembakaran limbah padat menjadi gas. Reaksi pembakaran fasa gas disempurnakan di dalam ruang sekunder. Kedua ruang utama dan sekunder secara umum dilengkapi dengan sistem bahan bakar pembantu.

Rotary kiln incinerator memutar-mutar sampah dalam kerangka silindris, yang memungkinkan terjadinya pencampuran yang seksama dengan udara. Kondisi operasional dapat mencapai suhu 1500-3000°F (800-1650°C), sehingga insinerator jenis ini memiliki resistansi paling baik terhadap pembakaran temperatur tinggi. Sistem insinerator jenis *rotary kiln* merupakan sistem pengolahan limbah yang paling universal dari segi jenis dan kondisi limbah yang dikelola. Insinerator jenis ini dapat digunakan untuk mengolah berbagai jenis limbah padat dan *sludge*, cair maupun limbah gas. Jumlah limbah cair, padat maupun gas data diumpun masuk dalam kuantitas yang sangat besar, dan juga dapat beroperasi secara *batch mode* yang memungkinkan lebih fleksibel dibandingkan dengan *continuous mode*.

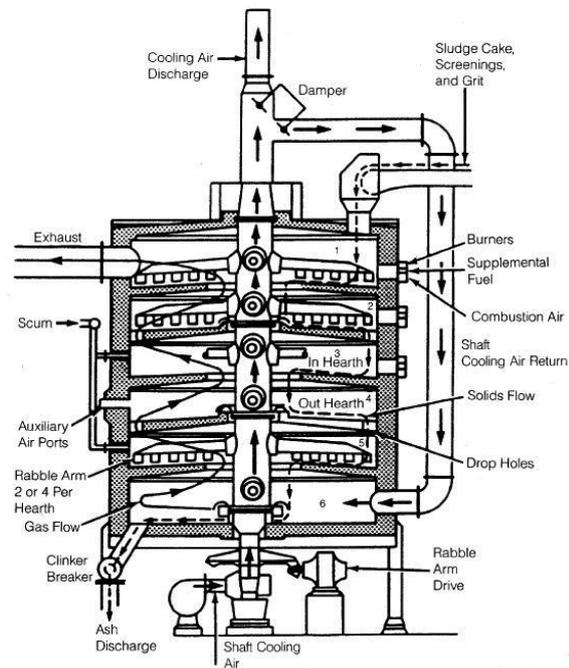


Gambar 4. *Incinerator Rotary Kiln*
(Sumber: Pollution issues /Ho-Li / Incineration, 2013)

b. *Multiple Hearth Incinerator*

Multiple Hearth Incinerator, 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 5. Multiple Hearth Incinerator
(Sumber : Combustion Portal, 2011)

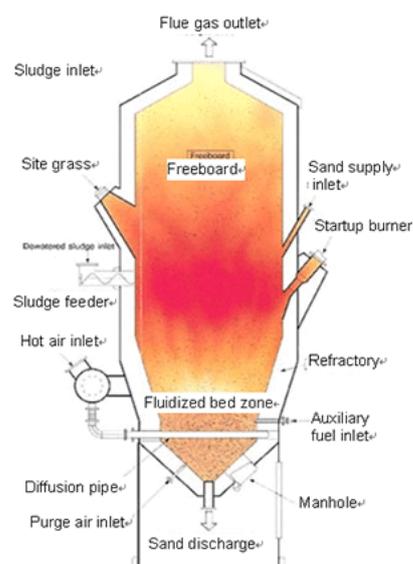
c. *Fluidized Bed Incinerator*

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 6. Fluidized Bed Incinerator

Sumber : Tsukishima Kikai, 2011

2.3.4 Ruang Bakar pada Insinerator

Pada *incinerator* terdapat 2 ruang bakar, yang terdiri dari *Primary Chamber* dan *Secondary Chamber* (Gunadi Priyamba, 2013).

a. *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.

b. *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.

2.3.5 Baku Mutu Emisi Udara yang Dihasilkan Insinerator

Pada proses pembakaran 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 (CO₂), air (H₂O) dan senyawa anorganik, tingkat senyawa organik akan berkurang. Untuk penghancuran dengan panas merupakan salah satu teknik untuk mengolah limbah B3 (bahan berbahaya dan beracun).

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

Tabel 3. 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 Palembang

Disamping itu, persyaratan lain yang harus dipenuhi dalam menjalankan insinerator adalah emisi udara yang dikeluarkannya harus sesuai dengan baku mutu emisi untuk insinerator. Untuk lebih jelas dapat dilihat pada tabel 4.

Tabel 4. 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 Palembang

2.4 Proses Pembakaran

Reaksi pembakaran bahan bakar merupakan reaksi kimia yang berdasarkan pada hukum kekekalan massa yaitu bahwa jumlah massa setiap elemen adalah sama selama reaksi kimia. Jumlah total massa setiap elemen di ruas kanan (produk) dan ruas kiri (reaktan) pada reaksi kimia harus sama. Menurut Istanto T dan Juwana (2007), pembakaran adalah reaksi kimia yaitu reaksi oksidasi bahan bakar yang berlangsung sangat cepat disertai dengan pelepasan energi dalam jumlah yang banyak.

Lima hal yang diperlukan untuk pembakaran yang baik adalah (Archie W. Culp, 1985):

- a. Pencampuran murni reaktan (proper mixing).
- b. Udara yang cukup.

- c. Temperatur yang cukup.
- d. Waktu yang cukup untuk berlangsungnya reaksi.
- e. Terdapat kerapatan yang cukup untuk merambatkan nyala api.

Lima syarat pembakaran tidak dapat dicapai pada pembakaran yang sebenarnya (aktual) karena itu perlu dicapai pada pembakaran yang sebenarnya (*excess air*). Pembakaran yang sempurna akan menghasilkan: CO₂, air, dan SO₂. Pada pembakaran yang tidak sempurna disamping produk pembakaran diatas, pada gas asap akan terdapat sisa bahan bakar, gas CO, hidrosil (OH), aldehyd (R-CHO) dan nitrogen, serta senyawa-senyawa oksida nitrat dan oksida nitrogen. Semua produk pembakaran diatas bersifat polusi kecuali H₂O dan N₂ (Muhammad Yusuf Firdaus, 2012).

Pembakaran dikatakan stoikiometri bila campuran bahan bakar dan oksigen (dari udara) mempunyai perbandingan yang tepat, sehingga tidak diperoleh sisa. Bila oksigen terlalu banyak, dikatakan campuran "*lean*" (kurus). Pembakaran ini menghasilkan api oksidasi. Sebaliknya, bila bahan bakarnya terlalu banyak atau tidak cukup oksigen dikatakan "*rich*" (kaya). Pembakaran ini menghasilkan api reduksi. Api reduksi ditandai oleh lidah api panjang, kadang-kadang sampai terlihat berasap. Keadaan ini juga disebut pembakaran tidak sempurna (Muhammad Yusuf Firdaus, 2012).

Proses pembakaran sampah 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. Gas ini selanjutnya bercampur dengan oksigen yang dapat mengalami reaksi oksidasi. Kondisi ini apabila menghasilkan temperatur cukup tinggi dan berlangsung lama dapat terkonversi secara sempurna (*complete combustion*) menghasilkan uap air dan CO₂ yang dilepaskan ke udara (Subagiyo dkk, 2013). 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 dkk 2013).

Menurut Istanto T dan Juwana (2007), pembakaran stoikiometri adalah pembakaran dimana bahan bakar terbakar sempurna dengan jumlah udara teoritis, yaitu apabila:

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

Penyebab proses pembakaran menjadi tak sempurna, dimana ditandai dengan terbentuknya C, H, 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)

2.5 LPG

LPG (*Liquified Petroleum Gas*) merupakan gas hasil produksi dari kilang minyak atau kilang gas. LPG terdiri dari campuran utama propan dan Butan dengan sedikit persentase hidrokarbon tidak jenuh (propilen dan butilene) dan beberapa fraksi C_2 yang lebih ringan dan C_5 yang lebih berat. Senyawa yang terdapat dalam LPG adalah propan (C_3H_8), Propilen (C_3H_6), normal dan iso-butan (C_4H_{10}) dan Butilen (C_4H_8). 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. Untuk memungkinkan terjadinya ekspansi panas dari cairan yang dikandungnya, tabung LPG tidak diisi secara penuh, hanya sekitar 80-85% dari kapasitasnya. Rasio antara volume gas bila menguap dengan gas dalam keadaan cair bervariasi tergantung komposisi, tekanan dan temperatur, tetapi biasanya sekitar 250:1 (wikipedia.co.id).

Sifat kimia dan fisika LPG adalah sebagai berikut (wikipedia.co.id):

- Cairan dan gas sangat mudah terbakar.
- Gas tidak beracun, tidak berwarna dan biasanya berbau menyengat.

- Gas merupakan cairan yang bertekanan di dalam tangki atau silinder.
- Cairan dapat menguap jika dilepas dan menyebar dengan cepat.
- Gas lebih berat dibanding udara sehingga akan banyak menempati daerah yang lebih rendah.

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 di dekat 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 volume uap/udara sehingga dapat menyebabkan bahaya (energyefficiencyasia.org).

2.6 Udara Pembakarann

2.6.1 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).

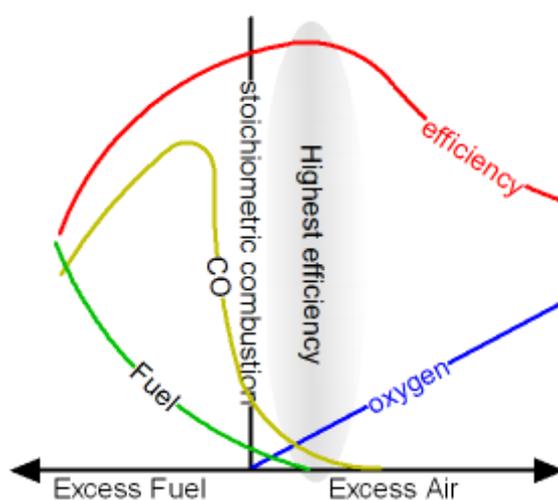
Udara teoritis adalah udara minimum yang dibutuhkan untuk pembakaran sempurna. Dalam prakteknya, kebutuhan udara pembakaran selalu lebih besar dari kebutuhan udara teoritis, dan disebut sebagai udara berlebih (*excess air*) (Muhammad Yusuf Firdaus, 2012).

2.6.2 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).



Gambar 7. Grafik stoikiometri pembakaran
(Sumber: engineeringtoolbox.com)

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).

2.6.3 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 atmosfer. Untuk menentukan tekanan absolut yang harus digunakan dalam hukum gas ideal, tekanan atmosfer harus ditambahkan dalam *pressure gauge*. Tekanan atmosferik rata-rata pada level laut adalah 14,7 psi atau 29,92 in merkuri (Hougen, 1954).

2.6.4 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 O₂ (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).

2.7 Reaksi Pembakaran

Reaksi pembakaran adalah reaksi bahan bakar dengan udara, udara yang digunakan untuk pembakaran mempunyai komposisi 79% mol gas N_2 dan 21% mol gas O_2 . Dalam proses pembakaran agar terjadi proses pembakaran sempurna maka udara yang digunakan untuk reaksi pembakaran harus lebih dari 100% atau udara yang digunakan untuk pembakaran harus berlebih.

Hasil reaksi pembakaran terdiri dari gas CO_2 , H_2O , N_2 dari udara dan gas O_2 berlebih, bila bahan bakar mengandung gas N_2 , maka gas N_2 yang dihasilkan merupakan jumlah gas N_2 dari udara dan gas N_2 dari bahan bakar. Reaksi pembakaran dari bahan bakar, dapat terjadi jika syarat-syarat kimia berikut tercapai:

- a. Terjadi kombinasi yang sempurna antara dua atau lebih reaktan berdasarkan rasio stoikiometrik.
- b. Massa elemen reaktan harus sama dengan massa hasil reaksi (hukum kekekalan massa)
- c. Senyawa kimia terbentuk dari elemen-elemen kombinasi dengan hubungan massa yang tetap.

(Azas Teknik Kimia, 2012)

- d. Formasi dari senyawa yang menghasilkan panas (reaksi eksotermik) ataupun yang membutuhkan panas (reaksi endotermik), berdasarkan atas perubahan energi bebas dari reaksi.

2.7.1 Panas Reaksi Standar

Didalam reaksi kimia selalu menghasilkan panas, panas reaksi yang dihasilkan berbeda untuk setiap kondisi. Bila panas reaksi terjadi pada komponen murni, tekanan standard dan temperatur standar disebut panas reaksi standar.

Contoh :



ΔH = Panas, subkrip "o" menunjukkan keadaan standar, subkrip "R" = reaksi. Panas reaksi dapat menyatakan sebagai perubahan energi produk dan reaktan pada volume konstan (ΔU) dan tekanan konstan (ΔH)



$$\text{Maka } \Delta H^\circ_{\text{R}} = H^\circ_{\text{produk}} - H^\circ_{\text{reaktan}}$$

(Termodinamika Teknik Kimia, 2010)

2.7.2 Panas Pembentukan standar ($\Delta H^\circ_{\text{f}}$)

Panas pembentukan standar dari senyawa didefinisikan sebagai panas bila 1 mol senyawa terbentuk dari beberapa unsur atau elemen dalam keadaan standar, sedangkan panas pembentukan unsur atau elemen = 0. Panas reaksi standar dapat dihitung dari panas pembentukan standar dapat dihitung dari produk dan reaktan. Hubungan antara panas reaksi standar dan panas pembentukan standar :

$$\Delta H^\circ_{\text{R}} = \sum \Delta H^\circ_{\text{f produk}} - \sum \Delta H^\circ_{\text{f Reaktan}}$$

(Termodinamika Teknik Kimia, 2010)

2.7.3 Panas Pembakaran Standar ($\Delta H^\circ_{\text{c}}$)

Panas pembakaran standar adalah panas standar yang terjadi dari reaksi pembakaran suatu senyawa hidrokarbon dengan O_2 yang berasal dari udara. Panas reaksi standar dapat dihitung dari panas pembakaran .

$\Delta H^\circ_{\text{R}} = \sum \Delta H^\circ_{\text{c produk}} - \sum \Delta H^\circ_{\text{c Reaktan}}$. Untuk senyawa hidrokarbon bila dibakar sempurna menghasilkan gas CO_2 dan H_2O , H_2O yang terbentuk dapat berupa uap dan cair (Termodinamika Teknik Kimia, 2010).

2.7.4 Panas Reaksi Pada Temperatur T ($\Delta H_{R,t}$)

Telah diketahui bahwa panas reaksi standar terjadi pada temperatur 25°C dan jika panas reaksi mengalami perubahan temperatur pada awal dan akhir reaksi, penyelesaian perhitungannya adalah :

$$\Delta H_{R,t} = \Delta H^{\circ}_C + \sum_p \int_{t_1}^{t_2} n C_p dt - \sum_R \int_{t_1}^{t_2} n C_p dt$$

$$\Delta H_{R,produk} = \sum_p \int_{t_1}^{t_2} n C_p dt \quad \text{dan} \quad \Delta H_{R,reaktan} = \sum_R \int_{t_1}^{t_2} n C_p dt$$

Dimana :

$\Delta H_{R,t}$ = panas reaksi pada temperatur t

ΔH°_C = Panas Pembakaran standar

$\Delta H_{R,reaktan}$ = Panas reaksi reaktan

$\Delta H_{R,produk}$ = Panas reaksi produk

(Termodinamika Teknik Kimia, 2010).