# BAB II
# TINJAUAN PUSTAKA

## 2.1 *State Of Art*

Penelitian ini tentunya menggunakan banyak referensi dari berbagai jurnal atau penelitian terdahulu sebagai dasar literatur dalam penelitian ini. Adapun penjelasan mengenai penelitian-penelitian terdahulu yang akan dijadikan acuan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. PENGARUH PENGGUNAAN AIR LAUT DAN UKURAN DROPLET TERHADAP KADAR PARTIKULAT GAS BUANG PADA INSENERATOR SAMPAH.

   Pada penelitian ini membahas mengenai pembilasan *system water scrubber* dilengkapi dengan 4 buah *misting nozzle* bertipe *cone nozzle* dengan sudut penyerapan $90^o$. Penurunan kadar opasitas yang efektif adalah sebesar 17,44%, sedang penurunan kadar $CO_2$ yang efektif adalah 2.64%. Pembilasan *system water scrubber* menggunakan *droplet size* kecil lebih effektif dikarenakan droplet ukuran kecil ini menghasilkan jumlah butiran yang lebih banyak dibandingkan dengan penggunaan *droplet size* besar [4].

2. *CHIMNEY FILTER MODEL WET SCRUBBER TO REDUCE AIR POLLUTANT EMISSIONSON THE INSINERATOR*

   Penelitian menunjukkan bahwa penggunaan filter cerobong scrubber dengan variasi debit air (3,2 liter/menit, 4,0 liter/menit, dan 5,6 liter/menit) dapat secara signifikan menurunkan kadar $SO_2$ dan CO hingga di bawah standar kualitas udara yang diizinkan. Namun, untuk gas NOx dan partikulat, meskipun terjadi penurunan, kadar tersebut masih berada di atas batas yang diperbolehkan [2].

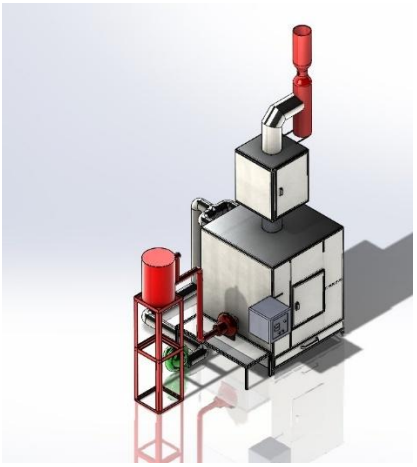
3. PERENCANAAN EMISI PM10 PADA INDUSTRI PELEBURAN BAJA CILEGON – BANTEN

   *Wet Scrubber* yang digunakan untuk perencanaan ini adalah *ventury scrubber* yang mempunyai nilai efisiensi untuk mengeliminasi partikulat sampai dengan 99%. Material lolos untuk ukuran partikel di bawah 5 µm

adalah sebesar 0,122. Dengan pressure drop sebesar 10,406 inci kolom air, partikulat yang disingkirkan sebesar 87,8% [5].

## 2.2 Insinerator

Pengolahan sampah secara termal melalui pembakaran menggunakan insinerator adalah alternatif pengolahan sampah yang efektif. Keuntungan menggunakan insinerator adalah bahwa mereka membutuhkan waktu yang lebih singkat untuk menguraikan sampah padat. Metode Insinerasi sampah dapat mengurangi volume sampah hingga 90% dan menghasilkan energi panas dari pembakaran [6]. Penggunaan alat insinerator dapat mengurangi efek negatif proses pembakaran di ruang terbuka seperti asap, bau, radiasi, dan panas yang dihasilkan dari pembakaran. Insinerator juga bisa mengubah bahan sampah menjadi gas dan abu sisa hasil pembakaran (*bottom ash* dan *fly* ash) [7].Selain itu, suhu yang dihasilkan dari pembakaran sampah dapat mencapai 500 hingga 1000$^{o}$C, sehingga sampah yang dibakar dapat diubah menjadi abu [8].



**Gambar 2.1** Insinerator

Selain itu, pengolahan sampah dengan insinerasi dapat mengurangi massa dan volume sampah serta sifat berbahaya dari sampah infeksius. Temperatur dan waktu pembakaran dalam insinerator adalah komponen penting. Dengan cara yang sama, penggunaan energi panas insinerasi dapat menghasilkan energi yang dapat digunakan. Insinerator adalah sebuah alat, sedangkan Insinerasi (*incineration*) atau pembakaran sampah adalah teknologi

pengolahan sampah yang melibatkan pembakaran bahan organic secara terus menerus menggunakan udara yang cukup dengan temperature yang tinggi [6]. Gas yang dihasilkan oleh insinerator dapat berupa abu, sisa pembakaran, partikulat, dan panas. Sebelum dilepaskan ke udara, gas yang dihasilkan harus dibersihkan. Ini karena gas yang dihasilkan masih mengandung polutan.

Prinsip proses insinerator adalah sebagai proses kimia yang membakar material padatan, cairan, atau gas untuk menghasilkan gas lain dan menghasilkan residu yang mengandung lebih sedikit material yang mudah terbakar. Reduksi volume biasanya 80–95%, dan reduksi massa 70–80%, tergantung pada kualitas pembakaran [4]. Proses pembakaran disebut insinerasi. Adapun sisa residu yakni sebagai berikut :

1. Residu gas, yang dihasilkan oleh cerobong insinerator, terdiri dari pertikulat, sulfur dioksida, nitrogen dioksida, karbon monoksida, asam klorida, furan, dan *Polynuclear Aromatic Hydrocarbon* (PAH)
2. Residu cair menggunakan aerosol dan cairan untuk mengontrol pencemaran udara. Ini adalah contoh penggunaan air pada *scrubber water*.
3. Residu padat terdiri dari gelas, abu, dan logam. Logam besi memiliki sisa unsur antara 10 - 25 %, dan logam lain seperti seng, tembaga, dan krom memiliki sisa 1% [4].

Penghancur sampah digunakan untuk menghancurkan sampah berbahaya, beracun, dan infeksi sehingga sampah terakhir dapat dibuang dengan aman ke tempat pembuangan sampah umum. menghancurkan bakteri patogen. Selain itu, meminimalkan pencemaran udara yang dihasilkan oleh pembakaran, sehingga gas buang yang keluar dari cerobong lebih terkontrol dan lebih ramah lingkungan.

## 2.3 *Wet Scrubber*

*Wet scrubber* adalah suatu perangkat yang digunakan untuk menghilangkan polutan dari aliran gas dengan cara membawa aliran gas tersebut berkontak dengan cairan pembersih, biasanya air. *Wet scrubber* juga merupakan alat *absorpsi* gas yang terdiri dari kolom dengan masukan gas dan ruang distribusi di bagian bawah. Setelah zat cair dimasukkan dan

distributornya ditempatkan di bagian atas, keluaran gas dan zat cair berada di bagian atas dan bawah. Kemudian diisi dengan massa zat cair atau inert di atas penyangganya dan di dalamnya. Ini dikenal dengan istilah isian menara atau isian menara. Gas masuk ke dalam *venturi wet scrubber*, dan air *spray* di dalamnya menyemprotkan air ke dalam gas [9]. Semakin kecil *ventury* di bagian tengah, aliran gas semakin cepat. Akibatnya, butiran air yang sangat kecil terbentuk ketika air shower terkena udara dengan kecepatan tinggi. Sebagian besar partikel polutan ditangkap di area ini, terutama di bagian *throat* yang paling kecil diameternya. Air dan partikel yang tertangkap akan terlempar ke dinding dan jatuh ke bawah membentuk *sludge* dan di tampung di dalam bak penampungan [10].

*Wet Scrubber* merupakan proses menghilangkan polutan dari gas buang yang dihasilkan oleh proses industri. *Wet Scrubber* biasa digunakan untuk berbagai kegiatan untuk mengurangi kadar sisa emisi gas buang yang tercipta. Aliran udara yang tercemar memasuki *wet scrubber* dan menggerakkan cairan di atas pelat saringan, menghasilkan penangkapan partikel dalam bentuk gelembung, tetesan, dan kabut cairan. Pencucian gelembung adalah nama prosedur ini. Karena mudah dirawat dan tidak mahal pada awalnya, ini adalah alternatif yang bagus untuk filter berserat untuk menghilangkan partikel dari aliran emisi gas buang yang dihasilkan oleh insinerator. Prinsip kerja *wet scrubber* ini adalah sentuhan gas dan absorben cair, atau kontak gas dan absorben cair dalam kondisi suhu lingkungan. Biogas yang masuk melalui bawah kolom akan diberikan cairan absorben dari atas kolom, sehingga gas $CO_2$ dan $H_2S$ diangkut oleh absorben cairan [9]. *Wet scrubber* memiliki banyak aplikasi di bidang industri yaitu boiler, insinerator, pengolahan logam, produksi bahan kimia, dan produksi aspal.

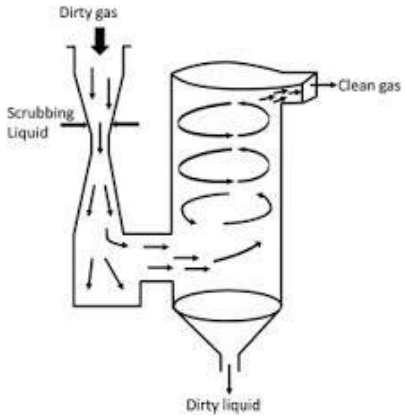
### 2.3.1 Mekanisme Wet Scrubber

Adapun mekanisme *wet scrubber* pada partikulat yang tertangkap oleh *droplet* pada *wet scrubber* dapat melalui mekanisme sebagai berikut [5] :

1. Mekanisme penangkapan utama adalah impaksi. Ketika gas buang mendekati tetesan air, arus mengalir di sekitar arus tersebut.

Partikel dengan kekuatan inersia yang cukup memengaruhi tetesan dan mempertahankan lintasan ke depan. Partikel dengan diameter lebih dari 10 μm biasanya dikumpulkan dengan impaksi karena massanya.

2. Partikel yang didominasi oleh gaya tarik pada fluida mengikuti arus gas buangan; aliran turbulen meningkatkan penangkapan dengan impaksi. Namun, karena tegangan permukaan *droplet*, partikel yang cukup dekat dengannya ditangkap melalui proses intersepsi. Partikel memiliki diameter sekitar 1,0 hingga 0,1 μm. Mekanisme ini juga ditingkatkan dengan meningkatkan densitas *droplet* semprotan.
3. Mekanisme gerak *Brown*, gerak tidak teratur yang dihasilkan oleh benturan acak molekul gas, digunakan oleh partikel berukuran sangat kecil. Saat *droplet* menyebar, partikel-partikel ini ditangkap. kumpulkan karena difusi adalah proses yang paling penting untuk partikel dengan diameter kurang dari 0,5 μm.
4. Mekanisme penangkapan kondensasi dan elektrostatik jarang digunakan. Pada elektrostatik, kontak ditingkatkan dengan menempatkan muatan elektrostatik pada partikel, droplet, atau keduanya. Pada kondensasi, aliran gas jenuh dengan uap air dan partikelnya ditangkap saat air mengembun pada partikel.




**Gambar 2.2** Ilustrasi Mekanisme *Wet Scrubber*

(Sumber : Sciencedirect.com)

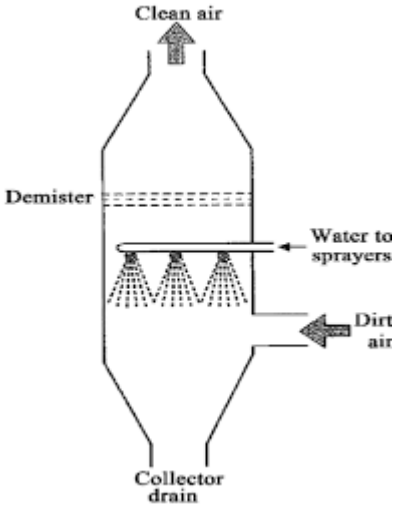
### 2.3.2 Jenis Wet Scrubber

Adapun jenis-jenis *wet scrubber* yang perlu kita ketahui secara umum, adalah sebagai berikut :

1. *Spray Tower*

   Salah satu jenis *scrubber* yang paling sederhana adalah menara semprot. Dalam menara semprot, udara sarat partikel masuk ke dalam ruang untuk menghasilkan cairan yang disemprotkan oleh *nozzle*. *Nozzle* dapat diarahkan berlawanan dengan aliran gas, ke arah yang sama dengan aliran gas, atau tegak lurus terhadap aliran gas. Partikel mengendap melalui proses impaksi, intersepsi, dan difusi. Ketika mereka tetap terbawa dalam aliran gas, mereka dikumpulkan pada penghilang kabut [5].

   *Spray tower* menggunakan impaksi untuk mengumpulkan partikel. Akibatnya, sangat efektif untuk mengumpulkan PM kasar. Partikel dengan diameter lebih dari 5 μm biasanya memiliki efisiensi 90%; partikel dengan diameter 3-5 μm memiliki efisiensi 60-80%; dan di bawah 3 μm, efisiensi hanya 50%. Daripada *wet scrubber* lainnya, *tower spray* memiliki biaya awal yang lebih rendah. *Spray tower* juga tidak kotor dan menggunakan sedikit listrik, sehingga biaya operasionalnya lebih rendah [5].

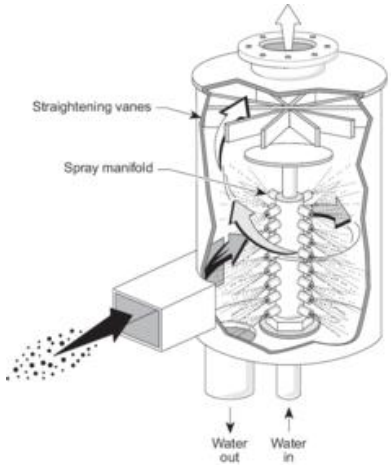



**Gambar 2.3** Ilustrasi *Spray Tower*

(Sumber : Indiamart.com)

2. *Cyclonic Spray Tower*

Karena aliran gas buang mengalir melalui ruang dalam gerakan siklon, desain tower *spray cyclonic* berbeda dari desain tower spray konvensional. Gerakan siklon dihasilkan dengan menempatkan baling-baling di dalam ruang *scrubber* atau dengan menempelkan inlet gas tangensial ke dinding ruang *scrubber*. Cairan *scrubber* disemprotkan dari *nozzle* di inlet atau dari puncak menara. Droplet yang masuk ke aliran gas mengalami gaya sentrifugal karena gerakan memutar. Akibatnya, droplet berpindah ke dinding menara. Tetesan jatuh ke dinding menara. Untuk menghilangkan partikel gas yang tersisa, ada alat yang disebut mist eliminator [5].




**Gambar 2.4** *Cyclonic Spray Tower*
(Sumber : wikipedia.org)

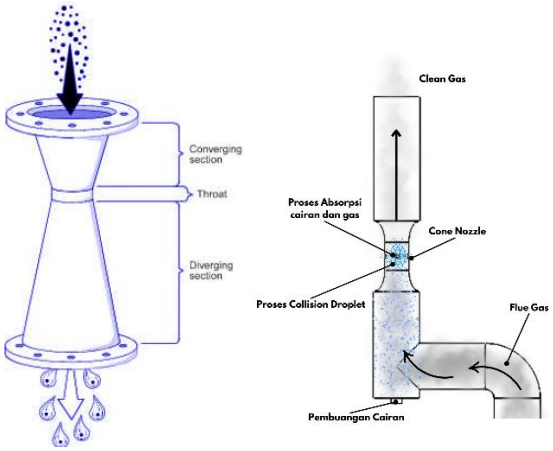
3. *Ventury Scrubber*

*Ventury scrubber* merupakan alat pengendalian pencemaran udara yang dipilih untuk perencanaan ini dan memiliki tingkat efisiensi sampai dengan 99%. Alat ini memiliki saluran yang dapat disesuaikan dan digunakan paling sering untuk menghilangkan partikulat. Mereka juga direkomendasikan untuk pabrik pembuatan baja dan besi [5].

*Ventury scrubber* juga memiliki saluran yang dikenal sebagai *"konvergen-divergen"*. Jenis sistem ini memiliki luas penampang saluran yang menurun sebelum meningkat sepanjang saluran.

Daerah tersempit disebut *throat*. Pada bagian konvergen, penurunan luas menyebabkan peningkatan kecepatan gas buang dan turbulensi. Cairan *scrubber* disuntikkan sedikit ke ujung *throat* atau langsung ke bagian tersebut. Turbulensi di *throat* mengabutkan cairan *scrubber*, meningkatkan kontak antara gas dan cairan. Campuran kemudian melambat saat bergerak melalui bagian divergen, menyebabkan tetesan terakumulasi. Di bagian *entrainment*, yang biasanya terdiri dari separator siklon dan *mist eliminator*, *droplet* kemudian dipisahkan dari aliran gas [5].

Sementara *ventury scrubber* lebih mahal dari pada *spray tower*, *cyclonic*, mereka lebih efisien dalam mengumpulkan PM halus dengan lebih banyak air drop. Kecepatan gas yang tinggi dan turbulensi di *ventury throat* menghasilkan efisiensi pengumpulan yang tinggi, berkisar antara 70% sampai 99% untuk partikel dengan diameter yang lebih besar dari 1 μm dan lebih besar dari 50% untuk partikel submikron. Namun, permintaan energi sistem juga meningkat, yang mengakibatkan peningkatan biaya operasional. Biaya kapital dan O&M cukup tinggi dibandingkan dengan biaya *spray tower* sederhana [5].

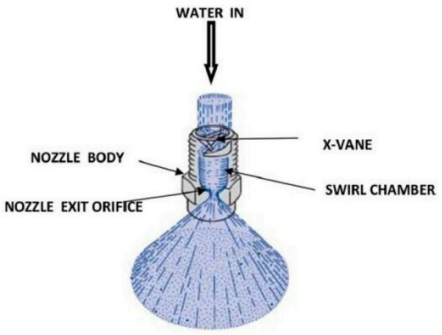



**Gambar 2.5** *Ventury Scrubber*

(Sumber : Advairtech.com)

## 2.4 *Cone Nozzle*

*Cone Nozzle* adalah jenis *nozzle* (penyemprot) yang menghasilkan semburan cairan dalam bentuk kerucut penuh (*full cone*). Semprotan ini menutupi area lingkaran penuh pada permukaan yang diterpa semburan, berbeda dengan *nozzle* semprotan kerucut berongga (*hollow cone*) yang hanya menutupi area di sekitar tepi luar dari kerucut. *Nozzle cone* digunakan untuk menghilangkan debu dan partikel-partikel padat dari udara karena memiliki luas area penyemprotan yang besar, sehingga dapat menutupi area yang luas dengan efektif. *Nozzle cone* dapat menghasilkan semprotan yang luas dan seragam, sehingga efektif dalam membersihkan udara dari partikel-partikel padat. Terdapat 2 tipe *nozzle*, yaitu *full cone nozzle* dan *hollow cone nozzle*. *Full cone nozze* memiliki pola semprotan bulat penuh berisi, sedangkan *hollow cone nozzle* menghasilkan pola semprotan berbentuk kerucut bulat kosong [11]. Karakterisasi *nozzel* simpleks dengan sisipan pusaran tipe X yang diamankan di dalamnya dilakukan dan juga aplikasinya dalam mengurangi emisi pada industri. Sisipan pusaran tipe X yang ada di dalam ruang pusaran memberikan gerakan berputar pada cairan. Nosel simpleks kerucut padat dan medan aliran yang dihasilkan ditunjukkan pada gambar dibawah ini [12].

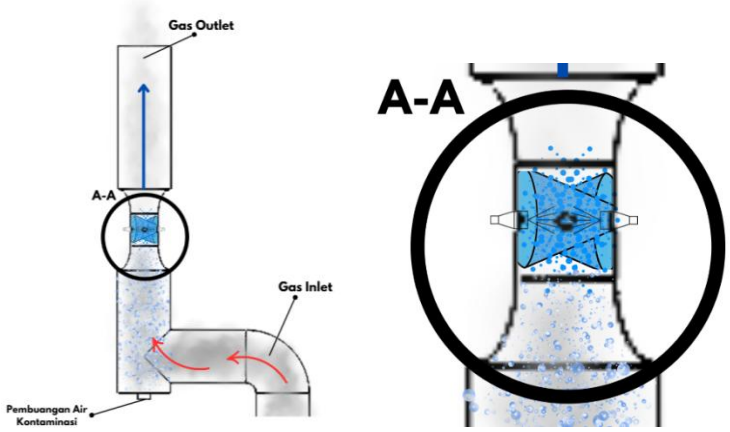



**Gambar 2.6** Hasil Semprotan *Cone Nozzle*

(Sumber : Shrigondekar, 2020 [12])

*Solid-cone simplex nozzle* bekerja dengan memanfaatkan prinsip *pressure-swirl atomization*, di mana cairan diberi tekanan tinggi dan dialirkan melalui ruang pusaran (*swirl chamber*) sebelum keluar melalui *orifice. Nozzle* ini menggunakan *X-type swirl-insert*, yaitu komponen yang menciptakan gerakan berputar pada cairan sebelum keluar, sehingga menghasilkan

semprotan yang lebih halus dan merata [12]. Adapun gambar yang menggambarkan *pressure-swirl atomization cone nozzle* pada ruang *throat ventury wet scrubber* adalah sebagai berikut:




**Gambar 2.7** *pressure-swirl atomization* Pada *Cone Nozzle*

Secara keseluruhan, *cone nozzle*, khususnya *solid-cone simplex nozzle*, memiliki desain yang sangat berperan dalam mengontrol pola semprotan dan ukuran *droplet* yang dihasilkan. Dengan memahami karakteristiknya, *nozzle* dapat dioptimalkan untuk berbagai aplikasi industri, termasuk dalam sistem pemadaman kebakaran berbasis *water mist*, pengendalian polusi udara, dan pendinginan industri [12]. Menurut Harshad Shrigondekar pada jurnal berjudul *Characterization of solid-cone simplex mist nozzles* melalui penelitiannya menggunakan PDIA *(Particle/Droplet Image Analyzer)* yang berfungsi untuk mengukur distribusi ukuran droplet pada *cone nozzle* 1/8 inch, menunjukkan bahwa ukuran droplet *cone nozzle* yakni 20.54 μm [12].

Kelebihan dalam penggunaan *cone nozzle* adalah sebagai berikut:

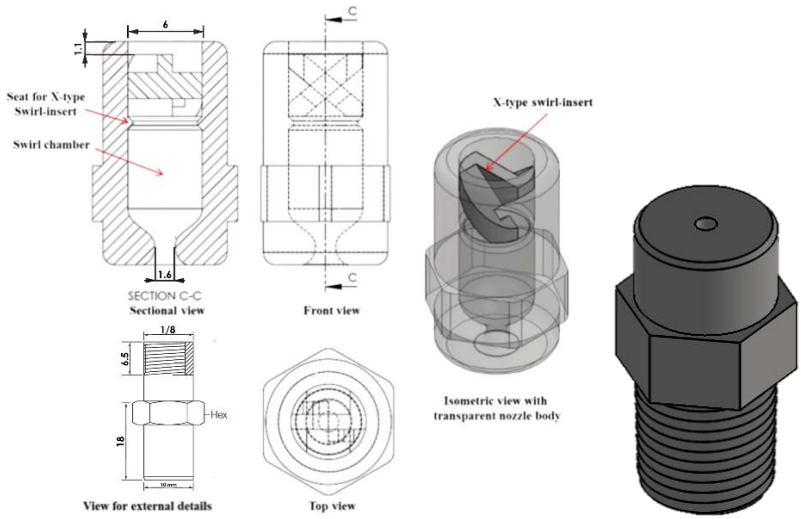
a. Distribusi penyemprotan lebih merata dan meluas sehingga dapat mereduksi emisi gas buang yang keluar dari insinerator.
b. Proses pendinginan dalam *wet scrubber* lebih cepat karena volume air yang dihasilkan lebih besar dan merata pada bagian *ventury wet scrubber*.
c. Tidak memerlukan tekanan air yang tinggi.

Namun dari kelebihan tersebut pasti ada kekurangan pada *cone nozzle* yakni :

a. Ukuran tetesan lebih besar dibanding *missting nozzle*

b. Penggunaan air lebih banyak

Adapun gambar dari *cone nozzle* dapat dilihat dibawah ini :




**Gambar 2.8** *Cone Nozzle*

(Sumber : H. Shrigondekar, 2020 [12])

## 2.5 Emisi Gas Buang

Emisi gas buang adalah gas atau zat-zat lain yang dilepaskan ke atmosfer sebagai akibat dari pembakaran atau reaksi kimia lainnya. Ini biasanya berasal dari mesin, pabrik, kendaraan, atau sumber industri. Berbagai senyawa dalam gas buang ini memiliki efek negatif terhadap kesehatan manusia dan lingkungan. Pada bidang industri, Emisi gas buang dihasilkan pada proses pembakaran bahan baku, pada bidang transportasi dihasilkan dari pembakaran yang dilakukan oleh mesin kendaraan [14].

Pembakaran sampah rumah tangga menghasilkan emisi gas buang, yang berkontribusi pada pembentukan gas rumah kaca karena emisi gas karbon dioksida ($CO_2$) dan nitrogen dioksida ($N_2O$) yang terlepas ke atmosfer. Selain itu, partikulat tambahan dapat dihasilkan selama proses pembakaran berlangsung, seperti logam berat, abu terbang, abu sisa pembakaran, dioksin dan furan, HCl, HF, $SO_2$, dan CxHy. Produk yang dihasilkan dari pembakaran harus dikontrol sampai mencapai ambang batas yang diizinkan supaya tidak mencemari lingkungan [3].

Sumber pencemar udara dapat dikategorikan menurut bentuk, lokasi, gangguan kesehatan, dan asalnya. Beberapa kategori pencemar udara adalah sebagai berikut [14]:

1. Pencemaran dalam bentuk gas dan partikel.
    a. Golongan belerang seperti Sulfur Dioksida ($SO_2$), Hidrogen Sulfida ($H_2S$) dan Sulfat Aerosol.
    b. Golongan Nitrogen terdiri dari Nitrogen Oksida ($N_2O$), Nitrogen Monoksida (NO), Amoniak ($NH_3$) dan Nitrogen Dioksida (NO2).
    c. Golongan Karbon seperti Karbon Dioksida ($CO_2$), Karbon Monoksida (CO) dan Hidrokarbon (HC).
    d. Golongan gas yang berbahaya seperti Benzen, *Vinly Klorida*, air raksa uap
2. Pencemaran udara berdasarkan tempat dan sumbernya
    a. Pencemaran udara bebas
        1) Pencemaran alamiah yang berasal dari letusan gunung berapi, pembusukan dan lain-lain.
        2) Pencemaran berdasarkan kegiatan manusia, misalnya berasal dari kegiatan industri, rumah tangga asap kendaraan, dan lain-lain.
    b. Pencemaran udara ruangan seperti pencemaran udara di dalam ruangan yang berasal dari pemukiman, perkantoran maupun gedung-gedung tinggi.
3. Berdasarkan susunan kimiawinya
    a. Anorganik adalah bahan pencemar yang tidak mengandung bahan Karbon seperti Asbertos, Amonia, asam sulfat dan lain-lain.
    b. Organik adalah zat pencemar yang mengandung karbon seperti pestisida, herbisida, beberapa jenis alkohol dan lain-lain.

Emisi gas buang dapat merusak lingkungan dan tubuh manusia. Hujan asam adalah hujan dengan PH rendah pada air yang dapat terjadi di lingkungan Anda. Tidak mungkin untuk menggunakan air yang dihasilkan untuk kebutuhan sehari-hari. Selain itu, hujan asam dapat merusak struktur dan komponen logam. Paru-paru adalah bagian dari tubuh manusia yang mengalami kerusakan. Penyakit seperti ISPA (Infeksi Saluran Pernafasan

Akut), asma, dan pneumonia dapat muncul ketika paru-paru menghirup udara yang tercemar zat-zat tersebut. Oleh karena itu, Agar kerusakan lingkungan tidak semakin parah, emisi gas buang harus ditangani lebih lanjut.

### 2.5.1 Karbon Monoksida (CO)

*Karbon Monoksida* (CO) adalah gas yang tidak berbau, tidak berasa dan juga tidak berwarna. Keberadaan *Karbon Monoksida* (CO) di alam tidak dapat dilihat, dirasakan ataupun diketahui warnanya, akan tetapi *Karbon Monoksida* (CO) di alam dengan jumlah besar (konsentrasi tinggi) akan berdampak buruk bagi kesehatan dan bahkan dapat menyebabkan kematian [14]. Parameter pencemar utama, karbon monoksida (CO), memengaruhi kesehatan manusia, terutama terkait dengan masalah pernapasan. Karbon monoksida dihasilkan oleh bahan bakar yang terbakar secara parsial sebagai hasil dari pembakaran yang tidak lengkap atau sebagai hasil dari campuran bahan bakar dan udara yang kaya akan bahan bakar [15].

Gas karbon monoksida (CO) dapat berasal dari sumber alami maupun antropogenik. Di alam, CO terbentuk melalui beberapa proses, di antaranya pembakaran tidak sempurna terhadap karbon atau senyawa yang mengandung karbon, reaksi antara karbon dioksida ($CO_2$) dengan senyawa karbon pada suhu tinggi, serta dekomposisi $CO_2$ menjadi karbon (C) dan oksigen (O). Sementara itu, sumber antropogenik CO terutama dihasilkan dari pembakaran bahan organik, dengan kontributor utama berupa aktivitas transportasi, khususnya kendaraan bermotor yang menggunakan bahan bakar bensin. Aktivitas ini menyumbang sekitar 65,1% dari total emisi CO antropogenik di udara. [14]. Reaksi antara gas karbon monoksida (CO) dan uap air ($H_2O$) menghasilkan karbon dioksida ($CO_2$) dan hidrogen ($H_2$).

$$CO + H_2O \rightleftharpoons CO_2 + H_2 \quad \text{.....(2.1)}$$

### 2.5.2 Karbon Dioksida ($CO_2$)

*Karbon Dioksida* ($CO_2$) memiliki prinsip berbanding terbalik dengan *Karbon Monoksida* (CO), yang mana apabila gas $CO_2$ tinggi

maka gas CO akan rendah, karena dalam proses pembakaran yang hampir sempurna $CO_2$ harus tinggi dan CO harus rendah, akan tetapi $CO_2$ yang tinggi dari hasil pembakaran dapat dilakukan dengan penghijauan untuk menyerap $CO_2$ [14].

Gas *karbon dioksida* merupakan gas buang yang tidak berwarna dan tidak berbau, $CO_2$ di atmosfir berasal dari pembakaran bahan bakar *fosil* yaitu minyak bumi, batu bara, dan gas bumi. Selain efek rumah kaca tersebut *karbon dioksida* juga berperan penting bagi kehidupan tanaman, $CO_2$ diserap oleh tanaman dengan bantuan sinar matahari dan digunakan untuk pertumbuhan tanaman dalam proses fotosintesis yang menghasilkan energi bagi tumbuhan [14]. Reaksi $CO_2$ dengan air merupakan reaksi keseimbangan yang membentuk $H^+$ dan $HCO_3^-$ (asam karbonat), di mana asam karbonat ini merupakan jenis asam lemah yang dapat menyebabkan korosi [16].

$$CO_2 + H_2O \rightleftharpoons H_2CO_3 \rightleftharpoons H^+ + HCO_3^- \text{.....(2.2)}$$

### 2.5.3 Hidrokarbon (HC)

*Hidrokarbon* (HC) merupakan salah satu jenis emisi yang dihasilkan dari sisa bahan bakar yang tidak terbakar sempurna dan ikut terlepas ke atmosfer bersama gas buang. Senyawa fitokimia yang terbentuk dari emisi HC dapat menimbulkan berbagai dampak kesehatan, seperti iritasi pada mata, nyeri tenggorokan, serta gangguan pada sistem pernapasan. Selain itu, hidrokarbon bersifat karsinogenik, yang berarti memiliki potensi untuk memicu kanker. Emisi HC juga berkontribusi terhadap terjadinya fenomena hujan asam, yang dapat berdampak negatif terhadap lingkungan [14].

*Hidrokarbon* (HC) sebagian besar dihasilkan dari aktivitas manusia, dengan sektor transportasi sebagai kontributor utama. Selain transportasi, sumber emisi HC lainnya meliputi pembakaran gas, minyak, arang, dan kayu; proses industri; pembuangan sampah; kebakaran hutan atau lahan; serta penguapan pelarut organik. Sektor transportasi menyumbang lebih dari 50% dari total emisi HC

antropogenik, menjadikannya sebagai sumber polutan buatan manusia yang paling dominan. Emisi HC dari kendaraan bermotor terutama dihasilkan dari pembakaran bahan bakar minyak yang tidak sempurna di dalam ruang bakar, sehingga bahan bakar yang tidak terbakar sepenuhnya tersebut terlepas ke atmosfer dalam bentuk *hidrokarbon.* Ketidaksempurnaan pembakaran ini disebabkan oleh berbagai faktor, termasuk efisiensi mesin yang rendah. Secara umum, bahan bakar apapun yang tidak mengalami pembakaran sempurna akan menghasilkan senyawa *hidrokarbon* sebagai salah satu produk sampingannya [14].

### 2.5.4 Oksigen ($O_2$)

Oksigen adalah unsur kimia yang tidak memiliki warna, aroma, atau rasa. Unsur ini sangat krusial dalam proses pembakaran, karena reaksi kimia antara bahan bakar dan *oksidator* menghasilkan pelepasan energi yang disimpan menjadi panas, yang kemudian menyebabkan api menyala. Bahan bakar adalah campuran kimia yang mengandung unsur karbon, hidrogen, oksigen, nitrogen, dan sulfur, yang melepaskan panas selama proses oksidasi. Oksidator adalah campuran yang mengandung oksigen yang akan bereaksi dengan bahan bakar. Peningkatan kadar oksigen dalam udara pembakaran dapat mengurangi energi yang hilang pada gas buang dan meningkatkan efesiensi pemansan.

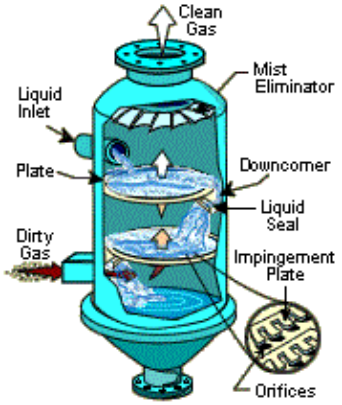
## 2.6 Absorpsi

Absorpsi merupakan proses pemisahan dengan mengontakkan campuran gas dengan cairan maupun padatan sebagai penyerap. Mengontakkan gas emisi dengan absorben adalah proses yang disebut absorbsi. *Dalam reaktor wet scrubber*, cairan (absorben) dialirkan ke aliran udara yang mengandung gas emisi, sehingga gas terfiltrasi ketika melewati cairan absorben [16]. Absorpsi merupakan suatu metode pemisahan yang dilakukan dengan cara mengontakkan campuran gas dengan suatu cairan, di mana satu atau lebih komponen gas terserap oleh cairan tersebut, sedangkan komponen lainnya tidak terserap [17]. Dalam proses absorpsi, komponen gas yang terserap

disebut sebagai *solute,* sementara cairan yang berfungsi sebagai penyerap disebut sebagai *solvent*. Apabila hanya satu komponen gas yang dapat terserap, proses tersebut dikenal sebagai absorpsi satu komponen. Sebaliknya, jika lebih dari satu komponen gas yang terserap, proses tersebut disebut sebagai absorpsi multikomponen. Cairan yang digunakan untuk melarutkan atau menyerap komponen gas, baik melalui proses fisik maupun reaksi kimia, disebut sebagai absorben. Absorben juga sering disebut sebagai cairan pencuci. Beberapa jenis bahan yang umum digunakan sebagai absorben antara lain air (untuk gas-gas yang mudah larut atau pemisahan partikel debu dan tetesan cairan), natrium hidroksida (untuk gas-gas yang dapat bereaksi dengan basa, seperti asam), dan asam sulfat (untuk gas-gas yang dapat bereaksi dengan asam, seperti basa) [17]. Jenis absorpsi ada dua macam yaitu *Chemical Absorption* dan *Physical Absorption:*

### 2.6.1 Physical Absorption

Absorpsi fisik adalah suatu proses penyerapan gas ke dalam larutan penyerap tanpa disertai reaksi kimia. Pada proses ini, gas terlarut dalam cairan penyerap melalui interaksi fisik murni. Contoh dari absorpsi fisik adalah penyerapan gas $H_2S$ oleh air, metanol, atau propilen karbonat, serta penyerapan gas $CO_2$ oleh air. Proses ini terjadi karena adanya interaksi fisik, difusi gas ke dalam cairan, dan perubahan fase gas menjadi fase cair [17]. Dalam praktiknya, proses absorpsi fisik dilakukan dengan mengalirkan gas dari bagian bawah kolom absorpsi, sementara cairan penyerap (seperti air) disemprotkan dari atas menggunakan *nozzle.* Di bawah *nozzle,* terdapat pelat berlubang yang dipasang secara horizontal. Gas yang mengalir dari bawah akan melewati lubang-lubang pada pelat yang telah digenangi oleh air dari bagian atas *scrubber*. Selama proses ini, gas berinteraksi dengan cairan penyerap, di mana gas yang terlarut akan mengalir ke bagian bawah kolom, sedangkan gas yang tidak terlarut akan terus mengalir ke bagian atas kolom untuk selanjutnya dibuang atau diproses lebih lanjut [16]. Berikut merupakan proses absorpsi gas dengan air pada gambar dibawah ini:




**Gambar 2.9** Proses Absorpsi Fisik

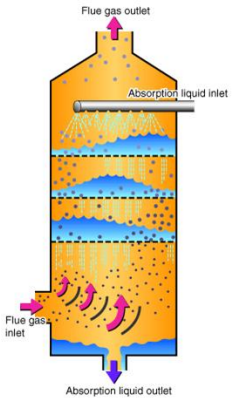
(Sumber : Mufidatul, 2014 [16])

Reaksi $CO_2$ dengan air merupakan reaksi keseimbangan yang membentuk $H^+$ dan $HCO_3^-$ (asam karbonat), di mana asam karbonat ini merupakan jenis asam lemah yang dapat menyebabkan korosi, karena itu proses absorpsi $CO_2$ dengan air lebih dinyatakan sebagai absorpsi fisik bukan absorpsi kimia [16].

$$CO_2 + H_2O \rightleftharpoons H_2CO_3 \rightleftharpoons H^+ + HCO_3^- \quad \text{.....(2.2)}$$

### 2.6.2 Chemical Absorption

Absorpsi kimia merupakan suatu proses penyerapan gas yang melibatkan reaksi kimia antara gas yang diserap dan absorben. Contoh bahan yang umum digunakan dalam absorpsi kimia meliputi larutan NaOH (*natrium hidroksida*), MEA (*monoetanolamin*), $K_2CO_3$ (*kalium karbonat*), dan $Ca(OH)_2$ (*kalsium hidroksida*). Pada proses ini, gas dialirkan melalui kolom absorpsi yang dilengkapi dengan pelat berlubang yang dipasang secara horizontal. Pelat-pelat ini berfungsi sebagai tempat penempatan absorben padat atau cair. Saat gas mengalir melalui kolom, gas tersebut akan menembus tumpukan absorben dan mengalami reaksi kimia. Gas yang telah bereaksi akan terus mengalir menuju outlet kolom absorpsi, sementara komponen gas yang telah terserap akan tertahan dalam absorben. Proses ini memungkinkan pemisahan gas tertentu dari campuran gas secara selektif melalui mekanisme reaksi kimia [16]. Adapun gambar proses *chemical absorpstion* adalah sebagai berikut:

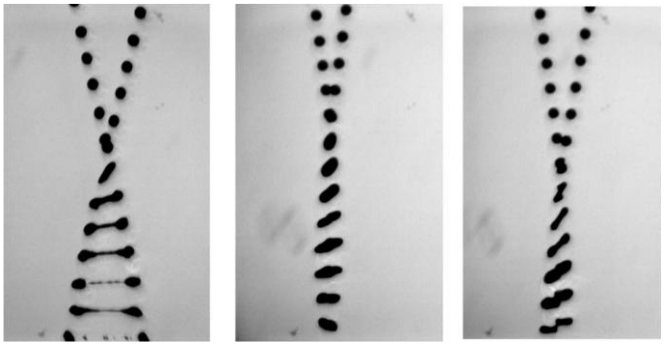



**Gambar 2.10** Proses Absorpsi Kimia

(Sumber : Mufidatul, 2014 [16])

## 2.7 *Collision Droplet*

*Collisions of liquid droplets* atau tabrakan tetesan cairan mengacu pada interaksi yang terjadi ketika dua atau lebih tetesan bersentuhan satu sama lain antara gas maupun cairan. Ketika dua *droplet* bertabrakan, ada beberapa kemungkinan hasil, yaitu menyatu (*koalesensi*), memantul (*bouncing*), terpisah kembali setelah menyatu (*separation*), atau pecah menjadi tetesan lebih kecil (*fragmentasi*) [18]. Adapun gambar hasil dari tabrakan antara dua droplet air bisa dilihat dibawah ini:

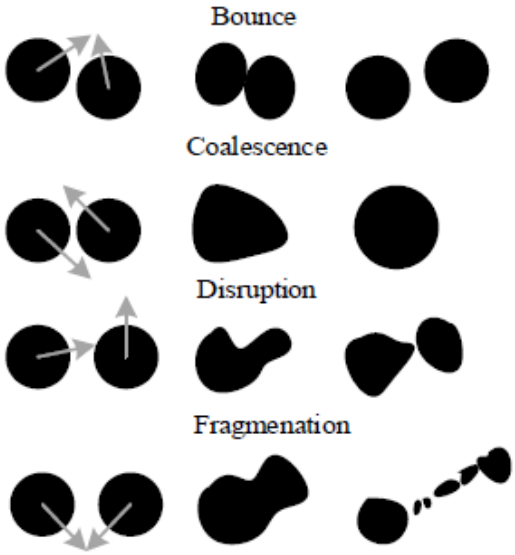


**Gambar 2.11** Perbedaan hasil 3 tumbukan air

(Sumber : Feuillebois, 2010 [19])

Hasil dari tabrakan ini sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor utama, seperti *Weber Number* (We) yang menentukan apakah droplet akan menyatu atau pecah, *Ohnesorge Number* (Oh) yang mempertimbangkan efek viskositas cairan, serta parameter lain seperti kecepatan, sudut tumbukan, tegangan

permukaan, dan perbedaan densitas antara cairan dan medium sekitarnya. Jika angka *Weber* rendah, *droplet* cenderung menyatu, tetapi jika *Weber* tinggi, *droplet* lebih mungkin terpecah menjadi banyak tetesan kecil. Proses ini sangat penting dalam teknologi penyemprotan, seperti pada *Ventury Wet Scrubber*, di mana semakin kecil ukuran *droplet*, semakin besar luas permukaannya, sehingga lebih efektif dalam menangkap dan menyerap polutan gas. Selain itu, ketika droplet bertabrakan dengan dinding atau partikel dalam gas, perilakunya juga bisa berbeda, misalnya, *droplet* bisa memantul jika mengenai permukaan hidrofobik atau pecah lebih cepat jika bertumbukan dengan permukaan kasar atau panas. [18].




**Gambar 2.12** *Type Droplet Collision*
(Sumber : Svetlana, 2021 [18])

Terdapat ukuran optimum untuk memaksimalkan pengumpulan partikel. *Droplet* lebih kecil memiliki permukaan lebih besar terhadap rasio volume, maka akan menangkap partikel lebih banyak per volume yang diinjeksikan. Jika ukuran *droplet* terlalu kecil, momentum dari arus gas dapat berpindah *droplet* yang akan menurunkan kecepatan relatif rendah sehingga menghasilkan *collection efficiency* yang rendah juga [13].

Tabrakan *droplet* air terjadi ketika dua tetesan air bertemu dalam suatu medium, seperti udara atau gas, dan berinteraksi satu sama lain. Proses ini

sangat dipengaruhi oleh keseimbangan antara energi kinetik, tegangan permukaan, dan *viskositas* cairan. Jika energi kinetik *droplet* cukup besar untuk mengatasi tegangan permukaan, maka droplet dapat pecah atau terpisah setelah bertabrakan. Sebaliknya, jika tegangan permukaan lebih dominan, *droplet* dapat menyatu dan membentuk tetesan yang lebih besar. Fenomena ini sering terjadi dalam berbagai aplikasi seperti sistem penyemprotan, pembentukan hujan, pengendalian polusi udara dengan *scrubber*, dan pendinginan industri [19].

## 2.8 Standar Emisi Insinerator

Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor: P.70/Menlhk/Setjen/Kum.1/8/2016 Tentang Baku Mutu Emisi Usaha Dan/Atau Kegiatan Pengolahan Sampah Secara Termal menetapkan standar emisi insinerator di Indonesia. Di bawah ini adalah tabel batas maksimum emisi gas buang pengolahan sampah secara termal, yang termasuk dalam peraturan [20]. Adapun ambang batas pengujian Pengolahan Sampah Secara Termal menetapkan standar emisi insinerator di Indonesia adalah sebagai berikut:

**Tabel 2.1** Batas Maksimum Emisi Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia

| No. | Parameter | Satuan | Batas Maksimum |
|---|---|---|---|
| 1 | Total Partikulat | mg/Nm3 | 120 |
| 2 | Sulfur Dioksida ($SO_2$) | mg/Nm3 | 210 |
| 3 | Oksida Nitrogen (NOx) | mg/Nm3 | 470 |
| 4 | Hidrogen Klorida (HCl) | mg/Nm3 | 10 |
| 5 | Merkuri (Hg) | mg/Nm3 | 3 |
| 6 | Karbon Monoksida (CO) | mg/Nm3 | 625 |
| 7 | Hidrogen Fluorida (HF) | mg/Nm3 | 2 |
| 8 | Dioksin & Furan | mg/Nm3 | 0.1 |

Sumber : P.70/Menlhk/Setjen/Kum.1/8/2016

Keterangan :

1) Volume gas diukur dalam keadaan standar (25$^{o}$C dan tekanan 1 (satu) atmosfer).
2) Semua parameter dikoreksi dengan Oksigen ($O_2$) sebesar 11%.
3) Pengukuran dioksin dan furan dilakukan setiap 5 (lima) tahun sekali.