



TUGAS AKHIR - RE 184804

KAJIAN KANDUNGAN EMISI INSINERASI SAMPAH KEMASAN PLASTIK PADA WET SCRUBBER

MUHAMMAD FARHAN AZIZI
NRP. 03211640000090

Dosen Pembimbing:
Prof. Ir. Joni Hermana, M.Sc.Es., Ph.D

Departemen Teknik Lingkungan
Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2021



FINAL PROJECT - RE 184804

STUDY OF EMMISIONS FROM INCINERATION PLASTIC PACKAGING WASTE ON WET SCRUBBER

MUHAMMAD FARHAN AZIZI
NRP. 03211640000090

Advisor:
Prof. Ir. Joni Hermana, M.Sc.Es., Ph.D

Department of Environmental Engineering
Fakulty of Civil Planning and Geo Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2021

LEMBAR PENGESAHAN

**KAJIAN KANDUNGAN EMISI INSINERASI SAMPAH
KEMASAN PLASTIK PADA WET SCRUBBER**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada

Program Studi S-1 Departemen Teknik Lingkungan
Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

MUHAMMAD FARHAN AZIZI

NRP. 03211640000090

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir



Prof. Ir. Joni Hermana, M.Sc.Es., Ph.D

NIP. 19600618 198803 1 002

**SURABAYA
FEBRUARI, 2021**



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

Kajian Kandungan Emisi Insinerasi Sampah Kemasan Plastik Pada Wet Scrubber

Nama Mahasiswa: Muhammad Farhan Azizi

NRP : 03211640000090

Departemen : Teknik Lingkungan

Pembimbing : Prof. Ir. Joni Hermana, M.Sc.Es., Ph.D

ABSTRAK

Pembakaran sampah plastik dengan menggunakan insinerator dapat menghasilkan keluaran berupa emisi yang berbahaya bagi lingkungan sekitar. Dibutuhkan penggunaan teknologi yang dapat mengurangi hasil pencemaran yang ditimbulkan dari pembakaran tersebut, salah satunya penggunaan *wet scrubber*. Kajian ini dilakukan untuk menentukan kondisi ideal *wet scrubber* berdasarkan dimensi media packing yang digunakan. *Wet scrubber* yang digunakan dalam kajian ini ialah jenis *cocurrent packed column tower*.

Kajian ini memiliki dua buah variasi untuk dilakukan, yaitu variasi tinggi media packing dan jenis media packing yang dapat digunakan pada *wet scrubber*. Variasi untuk tinggi media packing sebesar 30 cm. Variasi untuk jenis media packing berupa Pall Ring dan Raschig Ring berdiameter 1 inch. Parameter yang diukur dalam kajian ini, yaitu volume kontak aktual dan efisiensi penyisihan optimum yang dihasilkan untuk emisi CO dan SO₂ pada *wet scrubber*. Kajian ini dilakukan berdasarkan data sekunder dari penelitian sebelumnya yang menghasilkan efisiensi penyisihan optimum dan volume kontak aktual.

Hasil kajian ini berupa penggunaan jenis media packing yang memiliki faktor packing tinggi akan menyebabkan meningkatnya hasil volume kontak teoritis. Volume kontak aktual tertinggi yang dihasilkan media packing Pall Ring sebesar 0,044

m³ dan media packing Raschig Ring menghasilkan volume kontak aktual tertinggi sebesar 0,075 m³ untuk emisi CO. Lalu, volume kontak teoritis memiliki pengaruh terhadap efisiensi penyisihan optimum yang dihasilkan pada *wet scrubber*. Efisiensi penyisihan optimum tertinggi yang dihasilkan sebesar 88% untuk penyisihan emisi SO₂ dengan penggunaan jenis media packing Pall Ring.

Kata Kunci : Emisi, efisiensi penyisihan emisi optimum, media *packing*, volume kontak, *wet scrubber*

Study of Emissions from Incineration Plastic Packaging Waste on Wet Scrubber

Name : Muhammad Farhan Azizi
NRP : 03211640000090
Department : Environmental Engineering
Supervisor : Prof. Ir. Joni Hermana, M.Sc.Es., Ph.D

ABSTRACT

Burning plastic waste using an incinerator can produce emissions that are harmful to the surrounding environment. It takes the use of technology that can reduce the results of pollution caused by combustion, one of which is the use of a wet scrubber. This study was conducted to determine the ideal wet scrubber conditions based on the dimensions of the media packaging used. The wet scrubber used in this study is a solid column tower type.

This study has two variations to do, namely variations in the height of the packing media and the types of packing media that can be used in the wet scrubber. The variation for the height of the packing media is 30 cm. Variations for the type of packing media are Pall Ring and Raschig Ring with a diameter of 1 inch. The parameters measured in this study, namely the theoretical contact volume and the optimum removal efficiency produced for CO and SO₂ emissions in the *wet scrubber*. This study was carried out based on secondary data from previous studies which resulted in optimum removal efficiency and theoretical contact volume.

The results of this study in the form of using a type of packing media that has a high packing factor will increase the yield of theoretical contact volume. The highest actual contact volume produced by Pall Ring packing media is 0,044 m³ and Raschig Ring packing media produces the highest actual contact volume of 0,075 m³ for CO emission. Then, the theoretical contact volume has an influence on the optimum removal efficiency produced in

the wet scrubber. The highest optimum removal efficiency generated by 88% for SO₂ emission removal by using Pall Ring packing media.

Key Words : Emissions, optimum removal efficiency, packing media, contact volume, *wet scrubber*.

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT karena berkat rahmat dan karunia-Nya, Laporan Tugas Akhir yang berjudul “Kajian Kandungan Emisi Insinerasi Sampah Kemasan Plastik Pada Wet Scrubber” dapat diselesaikan. Pada kesempatan yang baik ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan semangat, bimbingan dan nasehat dalam penyusunan dan penulisan proposal tugas akhir terutama kepada:

1. Bapak Prof. Ir. Joni Hermana, M.Sc.Es., Ph.D selaku dosen pembimbing tugas akhir yang telah membimbing, memberi masukan, dan arahan.
2. Seluruh dosen pengarah baik pada sempro, progres, maupun sidang akhir yang telah memberikan saran dan masukan.
3. Teman-teman bimbingan Tugas Akhir, Rahar, Sasa, Munif, dan Asri yang telah bekerja sama dan saling mengingatkan satu sama lain terkait asistensi dan kemajuan dari Tugas Akhir.
4. Alif Yoga, Immanuel Berin, dan Dwi Wulandari yang telah mendukung dan membantu mengajarkan saya terkait Tugas Akhir saya.
5. Teman-teman lain yang menjadi penyemangat serta turut membantu dalam mencari referensi Tugas Akhir saya.
6. Orang tua, adik, dan keluarga besar yang telah menjadi motivasi dalam menyelesaikan Tugas Akhir dengan baik, dan memberikan dorongan, serta tak lupa selalu mendoakan dari kejauhan.

Laporan ini tentunya masih jauh dari kata sempurna. Banyak yang harus dibenahi dalam teknis dan isi dari penulisan. Kami berharap adanya saran dan kritik yang bersifat membangun, agar laporan ini dapat bermanfaat baik bagi penulis, perusahaan, serta pembaca.

Surabaya, Februari 2021

Penulis

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
ABSTRACT.....	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
BAB I PENDAHULUAN	15
1.1 Latar Belakang	15
1.2 Rumusan Masalah.....	17
1.3 Tujuan Kajian.....	17
1.4 Ruang Lingkup	17
1.5 Manfaat Kajian.....	18
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	19
2.1 Sampah Plastik.....	19
2.2 Insinerator.....	20
2.3 Pencemaran Udara	21
2.3.1 Karbon Monoksida	22
2.3.2 Sulfur Oksida.....	22
2.4 Absorpsi.....	22
2.4.1 Physical Absorption	22
2.4.2 Chemical Absorption.....	23
2.4.3 Absorpsi dalam Media Bed	23
2.5 Wet Scrubber.....	24
2.5.1 Metode Pengumpulan Partikel.....	25
2.5.2 Bagian-Bagian Wet Scrubber	26

2.5.3	Kondisi Operasional	26
2.5.4	Kelebihan dan Kekurangan.....	26
2.5.5	Desain Menara	27
2.6	Media Packing	29
2.6.1	Penyusunan <i>Media Packing</i>	29
2.6.2	Ketebalan <i>Media Packing</i>	30
2.7	Kesetimbangan Massa	30
2.8	Emisi Eksisting.....	32
2.9	Dimensi Wet Scrubber.....	34
2.9.1	Tinggi Packing.....	34
2.9.2	Diameter Kolom Packing.....	35
2.10	Baku Mutu.....	37
2.11	Penelitian Terdahulu.....	38
BAB III	METODE KAJIAN.....	41
3.1	Tahapan Kajian.....	41
3.2	Metode Studi.....	43
3.2.1	Kajian Pustaka	43
3.2.2	Studi Kasus	43
3.3	Variasi Data	45
3.4	Sistematika Penulisan	45
BAB IV	HASIL DAN PEMBAHASAN	47
4.1	Efisiensi Teoritis.....	47
4.2	Desain <i>Wet Scrubber</i> Teoritis.....	48
4.2.1	Diameter Kolom Teoritis.....	48
4.2.2	Volume Kontak Teoritis	49
4.3	Kondisi Optimum Wet Scrubber di Teknik Lingkungan ITS	50
4.3.1	Volume Kontak Aktual.....	50

4.3.2	Tinggi Packing Teoritis.....	50
4.3.3	Efisiensi Penyisihan Optimum	50
4.4	Pengaruh Jenis Media Packing terhadap Volume Kontak Teoritis	53
4.5	Pengaruh Volume Kontak Aktual terhadap Efisiensi Optimum	55
BAB V PENUTUP		59
5.1	Kesimpulan	59
5.2	Saran	59
DAFTAR PUSTAKA		61
LAMPIRAN		67
I.	Perhitungan H_{og} dan N_{og} Penelitian Sebelumnya.....	67
II.	Perhitungan Output Teoritis.....	68
III.	Perhitungan Diameter Kolom Teoritis	69
IV.	Perhitungan Volume Kontak Teoritis.....	71
V.	Perhitungan Tinggi Packing Teoritis.....	73

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Emisi SO ₂ pada <i>Wet Scrubber</i> dengan Tinggi Packing 30 cm.....	33
Tabel 2.2 Emisi CO pada <i>Wet Scrubber</i> dengan Tinggi Packing 30 cm.....	33
Tabel 2.3 Baku Mutu Emisi Kegiatan Pengolahan Sampah Secara Termal.....	38
Tabel 2.4 Penelitian Terdahulu.....	39
Tabel 3.1 Spesifikasi Alat.....	44
Tabel 3.2 Variasi Data Kajian.....	45
Tabel 4.2 Output Teoritis Rata-Rata Emisi SO ₂	48
Tabel 4.3 Efisiensi Penyisihan Emisi SO ₂ Optimum dengan Media Packing Raschig Ring.....	51
Tabel 4.4 Efisiensi Penyisihan Emisi SO ₂ Optimum dengan Media Packing Pall Ring.....	51
Tabel 4.5 Efisiensi Penyisihan Emisi CO Optimum dengan Media Packing Raschig Ring.....	51
Tabel 4.6 Efisiensi Penyisihan Emisi CO Optimum dengan Media Packing Pall Ring.....	52
Tabel 4.7 Perbandingan Output Optimum dengan Baku Mutu....	52

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Desain Menara dengan Aliran Berlawanan atau Countercurrent	28
Gambar 2.2 Desain Menara dengan Aliran Searah atau Cocurrent.....	29
Gambar 2.3 Skema Kolom Wet Scrubber Cocurrent	31
Gambar 3.1 Kerangka Kajian Pustaka dengan Studi Kasus.....	45
Gambar 3.2 Desain Wet Scrubber Teknik Lingkungan ITS.....	45
Gambar 4.1 Grafik Pengaruh Penggunaan Jenis Media Packing terhadap Volume Kontak Teoritis untuk Emisi SO ₂	54
Gambar 4.2 Grafik Pengaruh Penggunaan Jenis Media Packing terhadap Volume Kontak Teoritis untuk Emisi CO.....	54
Gambar 4.3 Grafik Pengaruh Volume Kontak Aktual terhadap Efisiensi Optimum untuk Emisi CO	56
Gambar 4.4 Grafik Pengaruh Volume Kontak Aktual terhadap Efisiensi Optimum untuk Emisi SO ₂	56

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada era ini, Indonesia memiliki berbagai macam jenis permasalahan baru yang melanda dan permasalahan yang belum terselesaikan dengan tuntas. Salah satu jenis permasalahan yang melanda Indonesia ialah permasalahan sampah yang semakin banyak dihasilkan. Dari berbagai macam jenis sampah yang ada pada saat ini, sampah plastik memiliki jumlah yang sangat banyak. Sampah plastik saat ini telah tersebar luas di lingkungan laut (Nelms dkk., 2015). Indonesia menempati urutan ke-2 sebagai negara penimbun sampah plastik terbesar di dunia. Sebanyak 83% atau setara dengan 3,22 juta ton sampah plastik di perairan Indonesia tidak tertangani per tahunnya (Jambeck dkk., 2015).

Plastik merupakan bahan pengemas yang banyak digunakan untuk berbagai macam kebutuhan, namun memiliki dampak yang buruk bagi lingkungan sekitar. Hal ini bisa terjadi dikarenakan oleh sifat plastik yang sulit mengalami degradasi di alam. Salah satu jenis plastik yang sering digunakan dan pada akhirnya menjadi sampah ialah *Polypropylene* (PP). Plastik jenis PP ini mempunyai sifat tahan terhadap kimia kecuali klorin, bahan bakar dan xylene, mempunyai sifat insulasi listrik yang baik. Jenis plastik ini juga tahan terhadap air mendidih dan sterilisasi dengan uap panas. Aplikasi jenis plastik ini berupa komponen otomotif, tempat makanan, karpet, dan lainnya (Purwaningrum, 2016). Namun, PP akan berdampak buruk bila sudah menjadi sampah karena sifatnya yang sulit untuk diuraikan. Hal ini dikarenakan sampah kantong plastik apabila ditimbun di dalam tanah, butuh sekitar 1000 tahun untuk dapat diuraikan oleh mikroorganisme (Bashir, 2013).

Permasalahan tersebut menjadi persoalan serius yang harus diatasi bersama. Proses Thermal dengan menggunakan insinerator dapat menjadi solusi alternatif untuk menanggulangi permasalahan tersebut. Insinerator dapat memusnahkan sampah dengan cepat, terkendali, in situ, serta tidak memerlukan lahan yang luas (Fadly, 2014). Proses insinerasi merupakan proses

pembakaran yang merupakan proses oksidasi bahan bakar (biomassa) dengan udara berlebih pada reaktor. Jenis sistem pembakaran ini mampu mengurangi volume sampah sebesar 90% lebih dengan waktu yang relatif singkat, serta dapat mendetoksifikasi bahan pathogen hingga 100% (Chang dkk., 2007). Walaupun demikian, insinerator mengeluarkan hasil samping dari proses pembakaran yang dilakukan berupa emisi PM, SO_x, CO, NO_x, dioksin, furan, logam dan gas-gas yang bersifat asam (HCl dan HF) (Trihadiningrum, 2016). Komponen emisi gas ini dapat memberikan dampak terhadap kerusakan tumbuhan, iritasi mata, gangguan pernafasan, penyakit kardiovaskular dan sebagainya. Oleh karena itu, diperlukan penanganan sesuai yang dapat mengendalikan emisi yang dihasilkan dari proses Insinerasi. Salah satu alat yang dianggap sesuai untuk mengatasi permasalahan emisi tersebut ialah dengan menggunakan *wet scrubber*.

Menurut EPA (1995), *wet scrubber* ialah teknologi absorpsi untuk mereduksi partikulat dan gas asam pada titik sumber pencemar. Unit *wet scrubber* pada dasarnya menggunakan kolom vertikal dimana terdapat dua masukan. Air dan gas dapat masuk ke *scrubber* melewati kolom vertikal yang ada. Air masuk ke kolom melalui bagian atas dan akan melakukan kontak dengan gas. Kemudian, sisa gas akan keluar melalui *stack*. Semakin banyak gas yang berkontak dengan air, maka gas yang terserap juga akan semakin banyak dan menghasilkan keluaran yang lebih baik. Packing menjadi bagian penting karena perannya yang dapat memberikan luasan permukaan kontak antara fase gas dan fase cair untuk terjadinya perpindahan massa (Mycook dkk., 1995). Efisiensi penyerapan emisi gas polutan dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor, diantaranya variasi ukuran dan ketebalan media.

Oleh karena itu, perlu dilakukan studi literatur terkait pengendalian emisi yang tepat untuk dapat dijadikan sebagai alternatif pengendalian. Pada kajian ini diharapkan penggunaan *wet scrubber* dengan arah aliran *co-current* dapat digunakan dalam mengurangi emisi yang dikeluarkan dari penggunaan insinerator di Departemen Teknik Lingkungan ITS.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam kajian ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh penggunaan jenis media packing terhadap volume kontak aktual dari emisi insinerasi di Departemen Teknik Lingkungan ITS yang dihasilkan *wet scrubber*?
2. Bagaimana pengaruh volume kontak teoritis terhadap efisiensi optimum emisi insinerasi di Departemen Teknik Lingkungan ITS yang dihasilkan oleh *wet scrubber*?

1.3 Tujuan Kajian

Tujuan dari kajian ini adalah :

1. Menentukan pengaruh penggunaan jenis media packing terhadap volume kontak aktual yang dihasilkan *wet scrubber* di Departemen Teknik Lingkungan ITS.
2. Menentukan pengaruh volume kontak teoritis terhadap efisiensi optimum emisi insinerasi yang dapat dihasilkan oleh *wet scrubber* di Departemen Teknik Lingkungan ITS.

1.4 Ruang Lingkup

Dalam kajian ini, ruang lingkungannya meliputi :

1. Studi kasus menggunakan *wet scrubber* untuk pengendalian emisi yang dihasilkan insinerator di Departemen Teknik Lingkungan ITS.
2. Media yang digunakan berupa pall ring dan raschig ring.
3. Sampel yang digunakan adalah data sekunder dari emisi insinerator sampah plastik dengan jenis sampah plastik berupa PP.
4. Absorben yang digunakan adalah air PDAM.
5. Variabel yang ditinjau berupa :
 - Tinggi packing sebesar 30 cm.
 - Media packing Raschig Ring 1 inch dan Pall Ring 1 inch.
6. Parameter yang ditinjau berupa :
 - Volume kontak teoritis untuk emisi CO dan SO₂ pada *wet scrubber*.
 - Efisiensi penyisihan optimum untuk emisi CO dan SO₂

pada *wet scrubber*.

1.5 Manfaat Kajian

Dalam kajian ini, manfaat yang dapat diperoleh meliputi :

1. Memberikan informasi serta pertimbangan dalam pengendalian emisi hasil pembakaran dengan penggunaan *wet scrubber*.
2. Memberikan solusi alternatif terkait pengendalian emisi yang dihasilkan dari proses Insinerasi.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sampah Plastik

Plastik merupakan senyawa polimer yang unsur penyusun utamanya adalah Karbon dan Hidrogen. Plastik adalah bahan organik yang mempunyai kemampuan untuk dibentuk ke berbagai bentuk, apabila terpapar panas dan tekanan. Plastik dapat berbentuk batangan, lembaran, atau blok, bila dalam bentuk produk dapat berupa botol, pembungkus makanan, pipa, peralatan makan, dan lain-lain. Komposisi dan material plastik adalah polymer dan zat additive lainnya. Polymer tersusun dari monomer-monomer yang terikat oleh rantai ikatan kimia (Purwaningrum, 2016)

Plastik dapat dikelompokkan menjadi dua macam yaitu *Thermoplastik* dan *Thermosetting*. *Thermoplastik* adalah bahan plastik yang jika dipanaskan sampai temperatur tertentu, akan mencair dan dapat dibentuk kembali menjadi bentuk yang diinginkan. Sedangkan, *Thermosetting* adalah plastik yang jika telah dibuat dalam bentuk padat, tidak dapat dicairkan kembali dengan cara dipanaskan. Berdasarkan sifat kedua kelompok plastik di atas, thermoplastik adalah jenis yang memungkinkan untuk didaur ulang. Berikut ini adalah macam-macam jenis plastik.

1. PETE atau PET
PETE atau PET (*polyethylene therephthalate*) biasa digunakan terutama pada botol minuman soft drink, tempat makanan yang tahan microwave dan lain-lain. Sifat dari jenis PET ini ialah ringan, murah, dan mudah membuatnya.
2. HDPE
HDPE (*high density polyethylene*) memiliki sifat lebih kuat, memiliki ketahanan lebih tinggi terhadap suhu tinggi, dan mudah didaur ulang. HDPE hanya memiliki sedikit sekali resiko penyebaran kimia bila digunakan sebagai wadah makanan dan bisa pula digunakan untuk wadah shampoo, deterjen dan kantong sampah.
3. PVC

PVC (*colyvinyl chloride*) memiliki karakteristik fisik yang stabil dan memiliki ketahanan terhadap bahan kimia, cuaca, sifat elektrik dan aliran. PVC biasa digunakan untuk pipa, konstruksi bangunan, dan peralatan elektronik.

4. LDPE

LDPE (*low density polyethylene*) memiliki sifat dapat didaur ulang dan baik untuk barang-barang yang memiliki tingkat fleksibilitas tinggi. LDPE biasa digunakan sebagai wadah makanan dan botol-botol.

5. PP

PP (*polypropylene*) memiliki ciri-ciri transparan yang tidak jernih atau berawan, lebih kuat, ringan dengan daya tahan tembus uap yang rendah. Jenis plastik PP biasa digunakan sebagai tempat penyimpanan makanan, tempat obat, dan komponen otomotif.

6. PS

PS (*polystyrene*) mempunyai sifat kekakuan dan kestabilan dimensi yang baik. PS biasa digunakan sebagai wadah makanan sekali pakai, kemasan, mainan, dan peralatan medis. Namun, bahan *Styrine* dapat berbahaya untuk otak karena mengganggu hormon pada wanita yang berakibat pada reproduksi dan syaraf.

7. Other

Jenis plastik ini terbuat dari lebih dari satu jenis resin dan digunakan dalam bermacam-macam lapisan.

2.2 Insinerator

Insinerator adalah tungku pembakaran untuk mengolah limbah padat, yang mengkonversi materi padat (sampah) menjadi materi gas, dan abu, (bottom ash dan fly ash). Insinerasi merupakan proses pengolahan limbah padat dengan cara pembakaran pada temperatur lebih dari 800°C untuk mereduksi sampah mudah terbakar (*combustible*) yang sudah tidak dapat didaur ulang lagi, membunuh bakteri, virus, dan kimia toksik (Budiman, 2001). Teknologi insinerasi dan sistem pengolahan limbah temperatur tinggi lainnya digambarkan sebagai “Perlakuan Termal”. Menurut Christian (2008), pengolahan limbah dengan insinerator terutama bertujuan untuk mengurangi volume dari

limbah itu sendiri sampai sekecil mungkin, kemudian juga untuk mengolah limbah tersebut supaya menjadi tidak berbahaya bagi lingkungan serta stabil secara kimiawi. Meskipun dapat dijadikan sebagai alternatif pengolahan, proses ini tetap menghasilkan emisi sebagai hasil samping. Hasil samping yang dihasilkan diantaranya ialah NO_x , SO_x , dan CO .

Insinerator memiliki ruang pembakaran yang berguna sebagai tempat pembakaran sampah yang akan dibakar. Pada chamber terdapat saluran untuk mengalirkan bahan bakar juga dilengkapi saluran untuk mengalirkan udara dari blower, yang diperlukan pada proses pembakaran, pembakaran ini dilakukan pada chamber tertutup, untuk menghindari bahaya toksin maupun infeksi dari sampah yang akan dimusnahkan (Purnamasari dkk., 2011). Jenis dan volume sampah yang akan dimusnahkan menjadi faktor yang dapat mempengaruhi waktu dari proses pembakaran tersebut. Pada insinerator, biasanya memiliki dua buah ruang pembakaran untuk membakar obyek dan membakar asap sebelum difilter, sehingga sisa-sisa karbon dari pembakaran yang terbawa asap akan semakin berkurang.

2.3 Pencemaran Udara

Menurut Pohan (2002), pencemaran udara adalah adanya bahan-bahan atau zat-zat asing di dalam udara yang menyebabkan perubahan susunan (komposisi) udara dari keadaan normalnya. Kehadiran bahan atau zat asing di dalam udara dalam jumlah tertentu serta berada di udara dalam waktu yang cukup lama, akan dapat mengganggu kehidupan manusia, hewan dan tumbuhan. Bila keadaan itu terjadi maka udara dikatakan telah tercemar. Berdasarkan jenis pencemarnya, pencemar udara terdiri atas pencemar spesifik dan pencemar indikator. Pencemar spesifik ialah pencemar yang berasal dari sumber spesifik di suatu tempat tertentu, seperti debu atau partikulat dari industri semen dan amonia dari industri pupuk. Pencemar indikator ialah pencemar bersifat umum dan ditemukan hampir di semua tempat, seperti CO_2 dan NO_x .

2.3.1 Karbon Monoksida

Karbon monoksida adalah salah satu jenis gas yang memiliki karakteristik tidak berwarna dan tidak beraroma. Menurut Trihadinungrum (2016), karbon monoksida dapat terbentuk selama pembakaran apabila tidak tersedia cukup oksigen. CO dapat bereaksi dengan Hemoglobin membentuk Karboksihemoglobin (HbCO) yang menghambat pembentukan Oksihemoglobin dalam transfer oksigen pada jaringan hidup. Keracunan CO dapat menyebabkan pusing kepala, muntah-muntah, dan kematian pada konsentrasi tinggi. Menurut Maryanto dkk. (2009), semakin tinggi konsentrasi CO yang terhirup oleh manusia maka semakin fatal resiko yang diterima oleh manusia tersebut, bahkan dapat menyebabkan kematian. Efek yang ditimbulkan CO membuatnya menjadi gas yang berbahaya untuk tubuh karena daya ikatnya terhadap Hb sebesar 240 kali dari daya ikat CO terhadap O₂.

2.3.2 Sulfur Oksida

Menurut Trihadiningrum (2016), sulfur oksida terdiri atas SO₂ dan SO₃ dibentuk apabila bahan bakar yang digunakan mengandung belerang atau sulfur. SO_x dapat mengakibatkan iritasi pada mata, hidung, dan tenggorokan. Pada konsentrasi tinggi SO_x dapat menyebabkan kematian karena menyebabkan gangguan paru-paru, seperti asma dan bronchitis. SO_x dapat pula menyebabkan terjadinya hujan asam dan salju asam yang dapat mempengaruhi hutan, danau, dan sungai.

2.4 Absorpsi

Absorpsi merupakan proses pemisahan dengan mengontakkan campuran gas dengan cairan maupun padatan sebagai penyerap. Jenis absorpsi ada dua macam, yaitu *Chemical Absorption* dan *Physical Absorption*.

2.4.1 Physical Absorption

Absorpsi fisik merupakan proses penyerapan gas yang terlarut dalam cairan yang tidak disertai dengan reaksi kimia, contoh absorpsi gas CO₂ dengan air, gas H₂S dengan air. Penyerapan terjadi karena adanya interaksi fisik, difusi gas ke

dalam air, pelarut gas ke fase cair (Rostika, 2011). Proses absorpsi fisik adalah gas dialirkan dari bawah kemudian air diseprotkan dengan menggunakan nozzle, dimana dibawah nozzle dilengkapi dengan pelat berlubang yang di letakkan horizontal. Gas yang mengalir dari bawah akan melintasi lubang - lubang yang ada pada setiap pelat yang digenangi oleh air yang mengalir dari bagian atas scrubber kemudian berinteraksi dengan biogas yang berasal dari bawah kolom gas yang tereduksi akan ikut menalir ke bagian bawah kolom, sedangkan gas yang tidak tereduksi akan mengalir kebagian atas kolom (Abdurrahman, 2013).

2.4.2 Chemical Absorption

Absorpsi kimia merupakan proses penyerapan gas yang disertai reaksi kimia, contoh absorpsi ini adalah absorpsi larutan NaOH, MEA, K₂CO₃, Ca(OH)₂ dan sebagainya. Proses absorpsi kimia adalah gas di alirkan dari kolom absorpsi, dimana bagian dalam kolom di lengkapi dengan plat berlubang yang diletakkan secara horizontal yang digunakan untuk tempat absorben padat tersebut. aliran gas tersebut akan menembus tumpukan padatan tesebut kemudian gas tersebut mengalir terus ke outlet kolom absorpsi.

Proses ini kondisi pada fase gas serupa dengan absorpsi fisik dan reaksi kimia yang terjadi disebut *irreversible*, dimana gas CO₂ pada fase gas akan di absorpsi oleh NaOH reaksi yang terjadi adalah sebagai berikut.



Persamaan diatas merupakan reaksi *irreversible*, dimana reaksi *irreversible* merupakan reaksi yang tidak bisa berubah ke bentuk semula.

2.4.3 Absorpsi dalam Media Bed

Tingkat perpindahan massa absorber dalam *packed bed* dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$N = A \times Z \times K_{G,P} \times a \times (p - p_i) \quad (2.3)$$

dimana,

N = laju transfer terlarut, kmol / jam.

A = luas penampang kolom, m².

Z = kedalaman *bed*, m.

a = luas antar area, m² / m³.

P = tekanan parsial zat terlarut dalam fase gas massal, Pa.

P_i = tekanan parsial zat terlarut dalam film gas di antar area, Pa.

$K_{G,P}$ = keseluruhan koefisien volumetrik (juga disebut koefisien transfer massa fase gas keseluruhan dalam hal tekanan parsial), kmol / (h.m³. Pa)

Luas antar area adalah luas transfer massa aktual antara fase liquid dan gas. Area ini belum tentu sama dengan luas permukaan geometris menara *packing*. $a \times AZ$ mewakili total luas antar area dalam seluruh menara *packing* (Chattopadhyay, 2007).

2.5 Wet Scrubber

Wet scrubber merupakan alat kendali polusi udara yang dapat digunakan untuk membuang gas yang tidak diinginkan seperti CO, NO_x, dan SO_x dari arus gas hasil pembakaran. Terdapat banyak konfigurasi *scrubber* dan sistem *scrubber*, semuanya dirancang untuk menyediakan kontak yang baik antara liquid dan gas kotor. Pada *wet scrubber*, arus gas kotor dibawa menuju kontak dengan *liquid* pencuci dengan cara menyemprotkan, mengalirkannya atau dengan metode kontak lainnya. *wet scrubber* membuang partikel dengan cara menangkapnya dalam tetesan atau butiran *liquid*. Sedangkan untuk polutan gas, *wet scrubber* melarutkan atau menyerap polutan ke dalam *liquid*. Butiran *liquid* yang masih terdapat dalam arus gas pasca pencucian selanjutnya harus dipisahkan dari gas bersih dengan alat lain yang disebut *mist eliminator* atau *entrainment separator*.

Menurut Khairumizan (2008), kemampuan *wet scrubber* untuk mengumpulkan partikulat berukuran kecil seringkali berhubungan langsung atau proporsional dengan *input power scrubber*. Alat *low energy* seperti *spray tower* digunakan untuk mengumpulkan partikel lebih besar dari 5 μm. Untuk menghasilkan efisiensi tinggi dari pembuangan partikel 1 μm (atau kurang) umumnya membutuhkan alat *high energy* seperti venturi atau alat

besar seperti *condensation scrubber*. Sebagai tambahan, *entrainment separator* yang didesain dan dioperasikan dengan baik penting untuk mendapatkan efisiensi pembuangan yang tinggi, semakin besar jumlah butiran liquid yang tidak tertangkap oleh *mist eliminator*, semakin besar potensi level emisi potensial.

Penangkapan polutan pada *scrubber* sesuai dengan prinsip dari Absorpsi. Absorpsi sendiri merupakan pemindahan massa dari satu tahap ke tahap lainnya. Langkah pertama dalam proses ini ialah polutan gas berdifusi dari fase gas ke antar muka gas cair. Langkah berikutnya, gas bergerak melintasi antar muka ke fase cair yang terjadi dengan sangat cepat. Langkah ketiga, gas berdifusi ke bagian cairan. Tingkat Absorpsi pada proses ini sangat bergantung pada tingkat difusi polutan yang terjadi pada langkah pertama, yaitu fase gas dan langkah ketiga, yaitu fase cair.

2.5.1 Metode Pengumpulan Partikel

Menurut Putra (2010), *wet scrubber* menangkap partikel debu yang kecil relatif terhadap butiran liquid yang besar. Di kebanyakan *wet scrubber*, droplet yang dihasilkan biasanya adalah lebih dari 50 mikrometer (dalam range 150 – 500 mikrometer). Sebagai tolak ukur, ukuran diameter rambut manusia berkisar antara 50 sampai 100 mikrometer. Distribusi ukuran partikel yang akan dibuang dalam sistem tergantung dari sumber. Contohnya, partikel yang dihasilkan dari peralatan mekanik (*crush* atau *grind*) cenderung besar (di atas 10 mikrometer), sedangkan partikel yang berasal dari *combustion* atau reaksi kimia akan memiliki partikel yang kecil (kurang dari 5 mikrometer) atau berukuran submikrometer. Ukuran partikel yang paling kritis adalah antara 0,1 – 0,5 mikrometer karena partikel dengan ukuran tersebut adalah yang paling sulit dikumpulkan atau dibuang oleh *wet scrubber*. Droplet atau butiran air dihasilkan dengan beberapa metode sebagai berikut :

- Injeksi liquid pada tekanan tinggi melalui nozzle yang didesain khusus.
- Mengalirkan arus gas menuju kolam liquid.
- Membenamkan rotor yang berputar dalam kolam liquid.

2.5.2 Bagian-Bagian Wet Scrubber

Wet scrubber umumnya memiliki bagian-bagian antara lain :

1. Shell

Ada dua macam bentuk dinding reaktor, yaitu silinder dan persegi. Dinding reaktor biasanya dapat terbuat dari logam, kayu, kaca, keramik atau plastik.

2. Kolom *Scrubber*

Kolom berfungsi sebagai media pendispersi larutan absorben dengan menyediakan luas permukaan yang cukup besar untuk menunjang terjadinya kontak gas dengan liquid baik secara kontinu atau konstan. Terdapat 2 jenis kolom yang sering kali digunakan, yaitu packed column dan plate column.

3. Entrainment Eliminator

Tetes cairan dapat keluar dari gas yang berasal dari penggunaan spray atau splash liquid distributor pada tekanan gas yang tinggi. Penggunaan mist eliminator bisa digunakan sebagai solusi yang dapat membuat liquid yang terbawa dapat jatuh ke dalam kolom *scrubber*.

2.5.3 Kondisi Operasional

Dalam desain absorber yang digunakan pada emisi gas, perpindahan masa optimum dapat dicapai pada kondisi (Boedisantoso, 2003) :

1. Adanya Interface untuk memperbesar permukaan kontak antara liquid dengan gas dengan menggunakan sprayer.
2. Adanya waktu kontak antar fase yang sesuai.
3. Tingkat solubilitas atau kelarutan yang tinggi dari kontaminan di dalam absorben.

2.5.4 Kelebihan dan Kekurangan

Menurut Bahrin (2015) dan Kencanawati (2007), *wet scrubber* memiliki sejumlah kelebihan dan kekurangan dalam penggunaannya. Kelebihan dari penggunaan *wet scrubber* antara lain :

1. Memerlukan ruang instalansi yang tidak terlalu besar.
2. Tidak menimbulkan sumber debu ikutan.
3. Memisahkan gas dan partikulat matter.
4. Dapat beroperasi pada suhu tinggi dan aliran gas dengan

kelembaban tinggi.

5. Memiliki kemampuan dalam melembabkan aliran gas.
6. Biaya modal yang cenderung rendah.
7. Dapat meminimalisasi bahaya ledakan dan kebakaran yang dapat ditimbulkan.

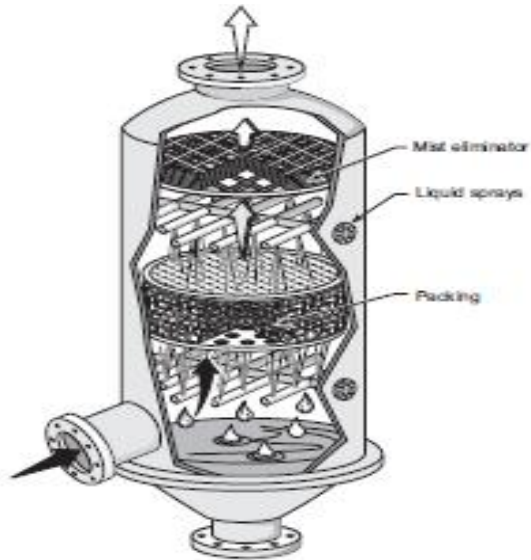
Sedangkan, kekurangan dalam penggunaan *wet scrubber*, yaitu:

1. Cenderung korosif.
2. Keperluan tenaga yang relatif besar.
3. Kebutuhan area yang luas demi keperluan penyimpanan limbah padat.
4. Memerlukan air yang banyak dan menimbulkan masalah pembuangan air.

2.5.5 Desain Menara

Desain menara atau *Tower Scrubber* biasanya ditentukan oleh pengaturan aliran yang digunakan untuk kontak gas-*absorben* atau oleh bahan yang digunakan sebagai pengepakan untuk unggun. Aliran berlawanan arus atau *countercurrent-flow* merupakan konfigurasi aliran yang umum digunakan untuk menara.

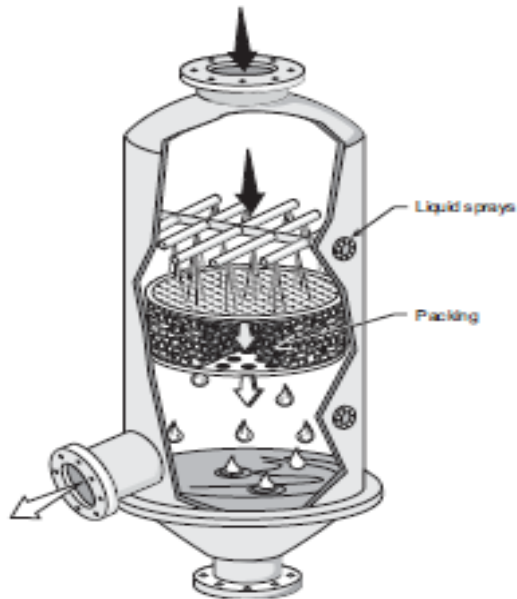
Pengaturan arus berlawanan menghasilkan efisiensi tertinggi yang dapat dicapai secara teoritis. Gas yang paling encer melakukan kontak dengan cairan penyerap yang paling murni, sehingga dapat memberikan perbedaan konsentrasi maksimum (tenaga penggerak) untuk seluruh panjang kolom. Dalam dua pengaturan aliran lainnya, cairan pembersih secara teoritis dapat mencapai konsentrasi yang sama dengan gas buang (karena mereka bergerak dalam arah yang sama) dan karenanya penyerapan akan berhenti. Menara yang dikemas dengan arus berlawanan tidak beroperasi secara efektif jika ada variasi besar dalam laju aliran cairan atau gas. Jika laju injeksi cair atau laju aliran gas melalui unggun kemasan terlalu tinggi, kondisi yang disebut *flooding* dapat terjadi. Ilustrasi terkait rancangan desain dari menara dengan jenis aliran ini akan ditampilkan pada gambar berikut.



Gambar 2. 1 Desain Menara dengan Aliran Berlawanan atau Countercurrent

Sumber: EPA, 2015

Aliran searah atau *cocurrent flow* yang berupa gas buang dan fase cair masuk di bagian atas absorber dan bergerak ke bawah yang berada di atas bahan kemasan. Ini memungkinkan absorber beroperasi pada laju aliran cairan dan gas yang lebih tinggi karena *flooding* bukan masalah. Kerugian utama adalah efisiensi pemindahan sangat terbatas yang disebabkan tenaga penggerak (perbedaan konsentrasi) ketika aliran mengalir turun melalui kolom, sehingga dapat menyebabkan terbatasnya area aplikasi untuk peredam arus. Ilustrasi terkait rancangan desain dari menara dengan jenis aliran ini akan ditampilkan pada gambar berikut.



Gambar 2. 2 Desain Menara dengan Aliran Searah atau Cocurrent

Sumber: EPA, 2015

2.6 Media Packing

Packing merupakan media penyedia luas permukaan tempat mengalirnya larutan absorbent untuk terjadinya reaksi perpindahan massa (Mycook dkk., 1995). Dalam proses absorpsi, penggunaan media packing dilandasi dari berkurangnya luas kontak yang terjadi dengan aliran gas karena aglomerasi. Menurut Cheremisinof (1993), *rasching ring*, *lessing ring*, *pall ring*, dan bola pingpong dapat dijadikan sebagai jenis packing yang umum untuk digunakan.

2.6.1 Penyusunan Media Packing

Penyusunan media dapat menjadi faktor yang mempengaruhi efisiensi kerja dari proses yang terjadi pada

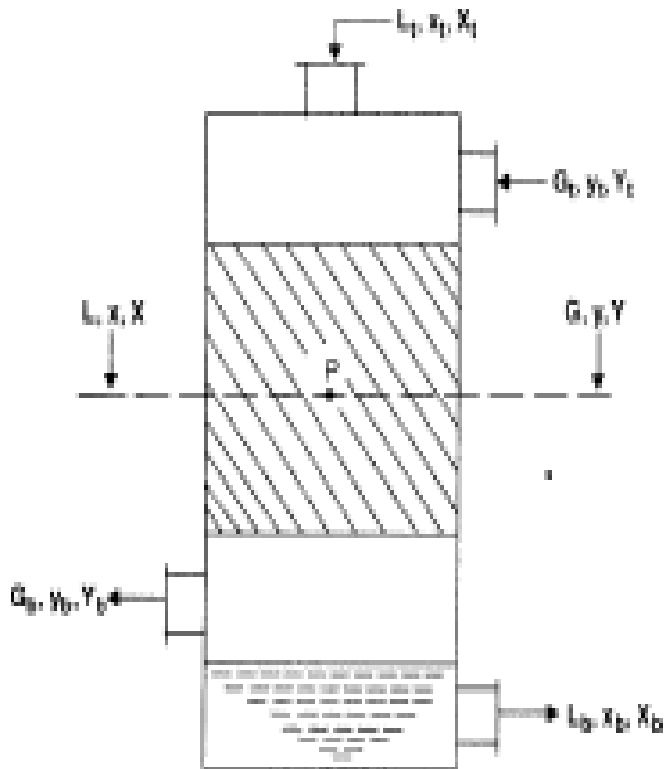
scrubber. Penyusunan secara acak (*moved packing*) dan penyusunan secara teratur (*fixed packing*) merupakan jenis penyusunan yang dapat dilakukan. Penyusunan teratur dipercaya akan menghasilkan distribusi liquid yang lebih baik dan mendapatkan *pressure drop* yang tergolong rendah. Hal ini dapat terjadi dikarenakan penyusunan dilakukan dengan cara memasukkan dan mengeluarkan *packing* secara perlahan satu demi satu agar didapatkan susunan yang teratur yang membuat distribusi melalui seluruh permukaan *packing*. Menurut McCabe *dkk.* (1993), biaya yang dikeluarkan untuk penyusunan secara teratur akan lebih besar dibandingkan dengan penggunaan penyusunan secara acak. Sedangkan pada penyusunan acak, luas permukaan yang dihasilkan akan lebih besar dan dapat mencegah terjadinya penyumbatan.

2.6.2 Ketebalan Media Packing

Ketebalan dari suatu *media packing* dapat menjadi faktor penting yang mempengaruhi kinerja dari proses absorpsi. Kedalaman *media packing* yang lebih besar dapat meningkatkan efisiensi dari *scrubber*. Target efisiensi pengurangan polutan dan tingkat efisiensi transfer massa yang digunakan *scrubber* menjadi dasar dalam penentuan ketebalan media yang diinginkan. Meskipun demikian, peningkatan *pressure drop* menjadi permasalahan yang ditimbulkan dari penambahan ketebalan media yang dilakukan, sehingga dibutuhkan penggunaan *blower* tambahan yang dapat menekan udara ke dalam *scrubber*. Menurut Kencanawati (2007), penggunaan ketebalan media yang terlalu besar dapat membuat berkurangnya waktu tinggal gas untuk melakukan kontak dengan *liquid*.

2.7 Kesetimbangan Massa

Transfer fisik zat terlarut pada *packed scrubber* dalam kondisi arah aliran searah dari aliran terjadi dari gas (uap) ke aliran cairan. Hal ini dikarenakan kedua aliran yang mengalir secara bersamaan ke arah yang sama melalui kolom yang ada. Skema dari arah aliran searah ditunjukkan seperti yang ada pada Gambar 3.3 berikut.



Gambar 2. 3 Skema Kolom Wet Scrubber Cocurrent

Sumber: Chattopadhyay, 2007

Keseimbangan material keseluruhan dari hasil kolom Menara dapat dirumuskan seperti :

$$L_t \times X_t + G_t \times Y_t = L_b \times X_b + G_b \times Y_b \quad (2.4)$$

dimana,

L_t, L_b = laju aliran cairan zat bebas-terlarut pada bagian atas dan bawah, kmol / (h.m²)

X_t, X_b = rasio massa zat terlarut dalam fase cair di bagian absorber atas dan bawah (horizontal)

Y_t, Y_b = rasio massa zat terlarut dalam fase cair di bagian absorber atas dan bawah (vertikal)

G_t, G_b = gas (uap) laju alir pada zat bebas-terlarut pada bagian atas dan bawah, kmol/(h.m²)

Laju aliran cairan dan gas yang konstan dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$L_s (X_t - X_b) = G_s (Y_b - Y_t) \quad (2.5)$$

$$\frac{Y_b - Y_t}{X_b - X_t} = \frac{Y_b - Y_t}{X_b - X_t} \quad (2.6)$$

Dimana,

L_s = laju aliran cairan zat bebas-terlarut, kmol / (h.m²)

G_s = gas (uap) laju alir pada zat bebas-terlarut, kmol/(h.m²)

Operation Line (OL) mewakili absorben dengan arah aliran searah.

Ketika aliran gas dan *liquid* mengalir bersamaan, OL akan memiliki kemiringan negatif $[-\frac{L}{G_s}]$. Karena P (X, Y) adalah titik di *packed bed* yang terletak pada satu jalur operasi, sehingga dapat direpresentasikan sebagai:

$$Y = Y_t - \frac{L}{G_s} [X - X_t] \quad (2.7)$$

2.8 Emisi Eksisting

Hasil kinerja dari penggunaan *wet scrubber* untuk mengendalikan emisi yang ada dapat dilihat dari hasil emisi yang dikeluarkan setelah proses berlangsung. Emisi dapat dikatakan baik apabila emisi yang dihasilkan tergolong memenuhi sesuai standar baku mutu yang telah ditetapkan. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh Pradani (2020), dapat dilihat bahwa nilai emisi yang dihasilkan mengalami fluktuasi. Emisi insinerator yang dihasilkan dapat dilihat pada Tabel 2.1 dan Tabel 2.2 berikut.

Tabel 2.1 Emisi SO₂ pada *Wet Scrubber* dengan Tinggi Packing 30 cm

Menit ke-	Input (ppm)	Output (ppm)	Removal (ppm)	%Removal
1	578	185	393	68%
2	646	217	429	66%
3	535	367	168	31%
4	427	293	134	31%
5	574	242	332	58%
6	686	253	433	63%
7	532	268	264	50%
8	383	227	156	41%
9	269	193	76	28%
10	156	128	28	18%
Rata-rata	478.6	237.3	241.3	50%

Sumber: Pradani, 2020

Tabel 2.2 Emisi CO pada *Wet Scrubber* dengan Tinggi Packing 30 cm

Menit ke-	Input (ppm)	Output (ppm)	Removal (ppm)	%Removal
1	1252	1142	110	9%
2	1326	1167	159	12%
3	1389	1025	364	26%
4	1389	1052	337	24%
5	1422	1176	246	17%
6	1673	1169	504	30%
7	1564	1015	549	35%
8	1438	1126	312	22%
9	1263	1109	154	12%
10	1126	982	144	13%
Rata-rata	1384.2	1096.3	287.9	21%

Sumber: Pradani, 2020

2.9 Dimensi Wet Scrubber

2.9.1 Tinggi Packing

Menurut Spellman dan Whiting (2005), dimensi *wet scrubber* berasal dari N_{og} . Berikut cara-cara yang dibutuhkan untuk mencari diameter pada *wet scrubber packed* media

$$Z = N_{og} \times H_{og} \quad (2.8)$$

Keterangan:

Z = Tinggi media *packing*

H_{og} = ketinggian unit transfer gas keseluruhan

N_{og} = angka unit transfer

Nilai H_{og} berasal dari penelitian eksperimen yang berfungsi sebagai fungsi viskositas pelarut dengan tingkat pemisahannya. Sementara, nilai N_{og} ini didasarkan dari fraksi mol input dan output yang dihasilkan oleh *wet scrubber* (Chattopadhyay,2013). Untuk mengetahui konsentrasi gas output *wet scrubber*, dapat dilihat pada Persamaan 2.9 sebagai berikut.

$$y_2 = (\%Output \times y_1) / (1-y_1) + (\%Output \times y_1) \quad (2.9)$$

Setelah mendapat y_2 , fraksi mol air yang keluar dapat dihitung dengan Persamaan 2.10 berikut.

$$x_2 = y_1 - y_2 \quad (2.10)$$

Keterangan :

x_2 = Fraksi mol output cairan

y_1 = Fraksi mol input gas

Perhitungan untuk mendapatkan nilai rasio minimum laju alir molar liquid dari kesetimbangan massa bisa dilakukan dengan Persamaan 2.11 berikut.

$$(L_m/G_m) = (y_1 - y_2) / (x_2 - x_1) \quad (2.11)$$

Keterangan :

X_1 = Fraksi mol input cairan

L_m = Laju alir molar cairan (kmol/m².jam)

G_m = Laju alir molar gas (kmol/m².jam)

Langkah berikutnya ialah mencari nilai absis dan mG_m/L_m . Perhitungan tersebut berguna untuk mendapatkan nilai N_{og} yang berada pada kurva Colburn. Persamaan untuk mendapatkan nilai absis dan ordinat dapat dilihat pada Persamaan 2.12 dan 2.13 berikut.

$$\text{Absis} = (y_1 - mx_2) / (y_2 - mx_2) \quad (2.12)$$

$$mG_m/L_m = m / (L_m/G_m) \quad (2.13)$$

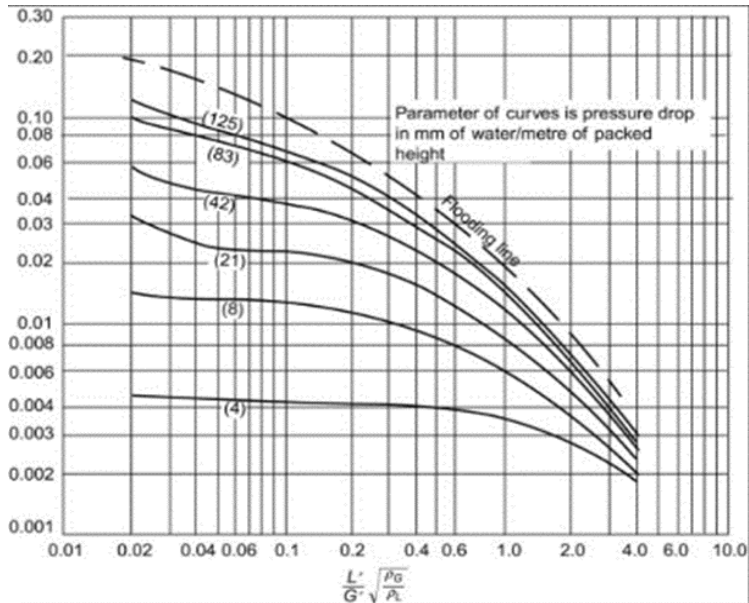
Bila tidak terdapat titik temu antar titik pada kurva, maka N_{og} dapat dihitung dengan Persamaan 2.14 berikut.

$$N_{og} = \text{Ln} (y_1/y_2) \quad (2.14)$$

Hasil N_{og} yang telah diketahui dapat disubstitusikan ke dalam rumus tinggi packing untuk mendapatkan nilai Z .

2.9.2 Diameter Kolom Packing

Perhitungan diameter teoritis diperlukan dalam mengetahui luas dan volume kontak. Sebelum melakukan perhitungan untuk mendapatkan hasil diameter teoritis, diperlukan besar kecepatan massa gas aktual. Kecepatan massa gas aktual bisa didapatkan dari kurva flooding dan pressure drop seperti pada Gambar 2.4 berikut.



Gambar 2.4 Kurva Korelasi Pressure Drop

Absis pada kurva di atas bisa didapatkan dari perbandingan densitas cairan dan udara dengan L_m/G_m . Persamaan lengkapnya dapat dilihat pada Persamaan 2.15 sebagai berikut.

$$(L/G)(\rho_g/\rho_l)^{0.5} = (L_m/G_m) (M_{rlq}/29) (\rho_g/\rho_l)^{0.5} \quad (2.15)$$

Keterangan:

- $M_{rlq}/29$ = rasio M_r liquid dengan M_r udara
- L = kecepatan massa cair ($\text{kg/cm} \cdot \text{detik}^2$)
- G = kecepatan massa gas ($\text{kg/cm} \cdot \text{detik}^2$)
- ρ_g = densitas gas (kg/m^3)
- ρ_l = densitas cairan (kg/m^3)
- G_m = laju aliran molar gas ($\text{kg} \cdot \text{mol/cm} \cdot \text{jam}^2$)
- L_m = laju aliran molar cair ($\text{kg} \cdot \text{mol/cm} \cdot \text{jam}^2$)

Untuk mendapatkan ordinat, tarik titik absis ke atas hingga bertemu dengan garis *pressure drop*. Setelah itu dicari ordinat berdasarkan grafik *pressure drop* pada Gambar 2.4.

$$\text{Pressure Drop} = 0.115P^{0.7} \quad (2.16)$$

Keterangan :

P = Ukuran media packing (inch)

$$G_f = \text{Ordinat}^2 F \psi (\mu L)^{0.2} / (\rho_l \rho_g g_c) \quad (2.17)$$

Keterangan :

F = Faktor media packing

ψ = rasio, massa jenis air / massa jenis liquid

$g_c = 32,2 \text{ (m/s}^2\text{)}$

μL = viskositas cairan (centipoise atau kg/m.s)

G_f = kecepatan massa gas (kg/m².s)

Langkah berikutnya setelah mensubstitusikan nilai ordinat ke G_f , maka akan didapatkan nilai G_f . Nilai G_f digunakan dalam mendapatkan nilai G_{aktual} . Persamaan untuk mendapatkan nilai G_{aktual} dapat dilihat pada Persamaan 2.18 berikut.

$$G_{\text{aktual}} = G_f \times \%V_{\text{flooding}} \quad (2.18)$$

Flooding adalah suatu kondisi dimana tidak ada lagi cairan yang dapat mengalir melalui kolom dan *pressure drop* sangat tinggi. Kecepatan gas pada kondisi flooding kecepatan flooding. Besar kecepatan flooding berkisar antara 50-70%. Setelah mendapatkan kecepatan massa gas sesungguhnya, diameter teoritis dapat ditentukan pada persamaan 2.19 berikut.

$$D = [(4(\dot{M}))/ (3,14 \times G_{\text{aktual}})]^{0.5} \quad (2.19)$$

2.10 Baku Mutu

Dalam menentukan batasan kondisi udara yang diperbolehkan dapat dilihat dari regulasi yang sudah ada dan ditetapkan. Batasan tersebut dimuat dalam Permen LHK RI Nomor 70 Tahun 2016 mengenai baku mutu emisi kegiatan di Indonesia.

Baku mutu emisi tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.2 sebagai berikut.

Tabel 2.3 Baku Mutu Emisi Kegiatan Pengolahan Sampah Secara Termal

Parameter	Satuan	Batas Maksimum
Total Partikulat	mg/Nm ³	120
Sulfur Dioksida (SO ₂)	mg/Nm ³	210
Nitrogen Oksida (NO ₂)	mg/Nm ³	470
Hidrogen Klorida (HCl)	mg/Nm ³	10
Merkuri	mg/Nm ³	3
Karbon Monoksida (CO)	mg/Nm ³	625
Hidrogen Florida (HF)	mg/Nm ³	2
Dioksin & Furan	mg/Nm ³	0,1

Sumber : Permen LHK RI No.70 Tahun 2016

2.11 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu diperlukan sebagai acuan yang digunakan dalam penyelesaian studi. Kajian terdahulu yang digunakan adalah seperti pada Tabel 2.4 berikut.

Tabel 2. 4 Penelitian Terdahulu

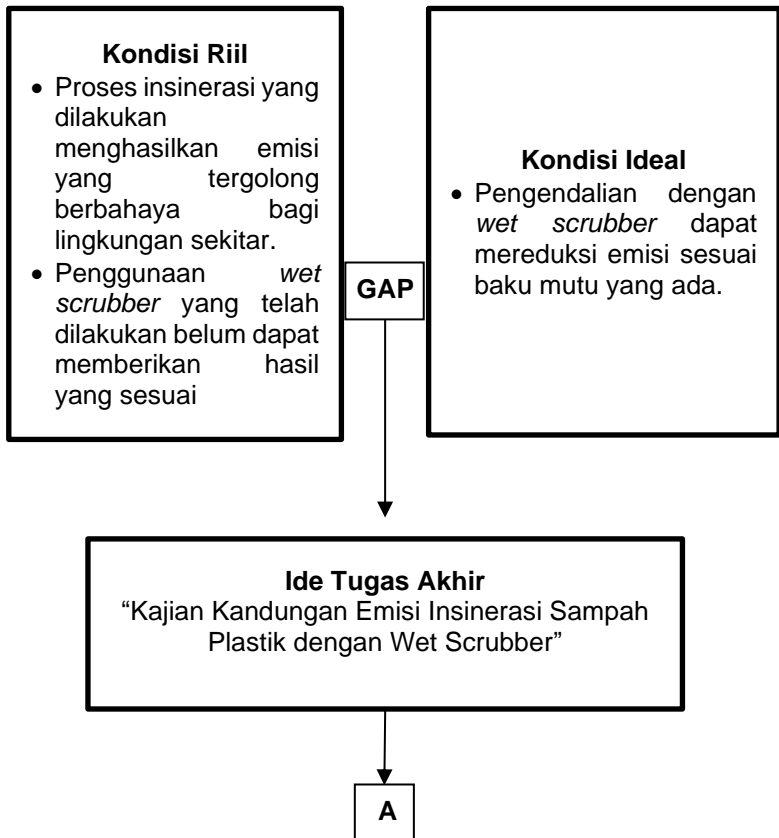
No	Referensi	Judul Penelitian	Hasil Penelitian
1.	Lailil Qurrotul Ain (2019)	Penurunan Kandungan Emisi Insinerator Sampah Plastik <i>Nonreusable</i> Menggunakan <i>Two Stage Packing Scrubber</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Variasi bentuk media packing memberi pengaruh pada efisiensi reduksi emisi dari insinerator - Variasi ketebalan media packing berpengaruh pada efisiensi reduksi emisi dari insinerator - Semakin kecil ukuran media yang digunakan, maka besar efisiensi reduksi emisi parameter CO, CO₂, NO, SO₂
2.	Yulanda Kurnia Pradani (2020)	Kajian Penurunan Emisi dengan menggunakan Venturi Vacuum pada Sistem Three Stage Filter <i>Wet Scrubber</i>	SO ₂ yang memiliki efisiensi tertinggi yang dikarenakan SO ₂ mempunyai nilai kelarutan yang paling tinggi.

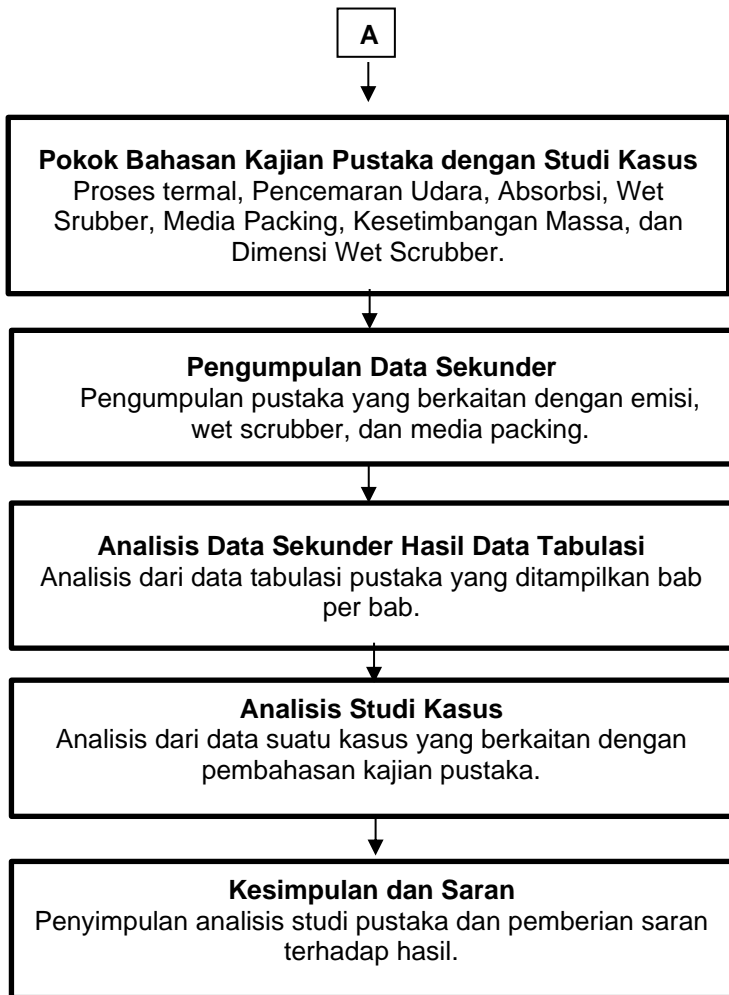
“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB III METODE KAJIAN

3.1 Tahapan Kajian

Secara sistematis, tahapan kajian “Kajian Kandungan Emisi Insinerasi Sampah Plastik dengan Wet Scrubber” dapat dilihat pada Gambar 3.1 berikut.





Gambar 3.1 Kerangka Kajian Pustaka dengan Studi Kasus

3.2 Metode Studi

Metode studi berisi rangkaian langkah-langkah studi yang akan dilakukan hingga mendapatkan kesimpulan. Metode studi dibuat agar pelaksanaan studi terarah dan dapat mencapai tujuan. Dalam penyusunan Tugas Akhir ini, rencana awal kajian adalah melakukan pengendalian emisi hasil insinerasi di Departemen Teknik Lingkungan ITS. Namun, dikarenakan situasi pandemi Covid-19, maka kajian dilakukan secara studi literatur dengan perhitungan teoritis untuk mendapatkan penyisihan emisi yang optimum. Oleh karena itu, pada kajian ini dilakukan dua tahap pelaksanaan, meliputi kajian pustaka dan studi kasus yang berkaitan dengan referensi yang dikaji. Berikut dua tahap pekerjaan pokok yang dilakukan dalam pelaksanaan Tugas Akhir ini.

3.2.1 Kajian Pustaka

Kajian pustaka dilakukan dengan menelusuri berbagai referensi yang berkaitan dengan *wet scrubber*, emisi, dan media packing. Dari hasil penelusuran pustaka ini, tulisan disusun kembali menggunakan bahasa penulis sendiri. Jenis kepustakaan yang dipelajari meliputi:

1. Buku Teks
2. Jurnal
3. Laporan penelitian
4. Laporan seminar/*proceeding*
5. Buletin

3.2.2 Studi Kasus

Studi kasus dalam penulisan Tugas Akhir ini adalah menghitung secara teoritis kemampuan penyisihan emisi menggunakan *wet scrubber* dengan referensi dari data sekunder dan berbagai pustaka yang telah dipelajari. Data yang diambil adalah data sekunder yang diperoleh dari:

1. Tugas akhir
2. Jurnal
3. Tesis

Data yang didapat lalu diolah dengan mensimulasikannya dengan *wet scrubber* teoritis yang beraliran *co-current* untuk dihubungkan dengan kajian pustaka yang telah

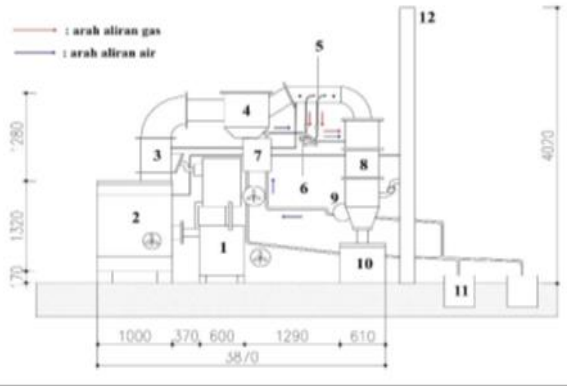
dipelajari. Perhitungan secara teoritis ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh volume kontak pada *wet scrubber* terhadap efisiensi penyisihan emisi hasil insinerasi dan mengetahui pengaruh penggunaan jenis media packing terhadap volume kontak teoritis. Langkah-langkah perhitungan yang digunakan dalam laporan ini, yaitu :

1. Memasukkan data awal yang merupakan data sekunder.
2. Menghitung nilai N_{og} berdasarkan data sekunder yang ada.
3. Menghitung diameter teoritis berdasarkan data sekunder yang ada.
4. Menghitung volume kontak aktual berdasarkan data sekunder yang ada.
5. Menghitung tinggi packing teoritis berdasarkan volume kontak teoritis dan diameter teoritis.
6. Menghitung efisiensi penyisihan emisi optimum berdasarkan tinggi packing teoritis yang didapat.

Berikut merupakan spesifikasi alat dan desain *wet scrubber* yang dapat dilihat pada Tabel 3.1 dan Gambar 3.2 berikut.

Tabel 3. 1 Spesifikasi Alat

Alat	Ketentuan	Spesifikasi
Pompa	Diameter	11 mm
	Kecepatan	25 L/menit
Fan	Diameter	7 cm
	Kecepatan	370 m/menit
Blower	Kecepatan	3000 rpm
	Diameter Outlet	2,5 inch
Wet Scrubber	Diameter Inlet	2 inch



Gambar 3. 2 Desain Wet Scrubber Teknik Lingkungan ITS

Sumber : Pradani, 2020

3.3 Variasi Data

Variasi data yang digunakan berupa media packing dan penyisihan *wet scrubber*. Variasi data kajian dapat dilihat pada Tabel 3.2 berikut.

Tabel 3.2 Variasi Data Kajian

Tinggi Packing	Jenis Media Packing	
	Raschig Ring	Pall Ring
T1	T1;M1	T1;M2

Keterangan :

T1 = Tinggi packing sebesar 30 cm

M1 = Media Packing Raschig Ring

M2 = Media packing Pall Ring

3.4 Sistematika Penulisan

Penulisan dari kajian pustaka, disusun berdasarkan sistematika penulisan Tugas Akhir di bawah ini:

- BAB 1: Pendahuluan

Bab ini menguraikan alasan yang melatarbelakangi penulisan Tugas Akhir, penjabaran perumusan masalah, tujuan yang ingin dicapai, ruang lingkup penulisan, dan manfaat yang akan didapatkan dari studi pustaka dengan studi kasus ini, serta sistematika penulisan dari Tugas Akhir.

- **BAB 2: Studi Literatur**

Bab ini berisi kumpulan literatur yang berhubungan dengan topik kajian untuk dijadikan sebagai referensi jalannya kajian.

- **BAB 3: Metode Kajian**

Bab ini berisi rangkaian langkah-langkah studi yang akan dilakukan hingga mendapatkan kesimpulan. Metode studi dibuat agar pelaksanaan studi terarah dan dapat mencapai tujuan.

- **BAB 4: Hasil dan Pembahasan**

Pada bab ini disajikan hasil perhitungan teoritis dari pengendalian emisi yang dilakukan oleh desain *wet scrubber* teoritis dan akan dibandingkan hasilnya dengan baku mutu yang digunakan.

- **BAB 5: Penutup**

Berisi kesimpulan studi literatur yang dilakukan dan saran yang berisi hal-hal yang masih dapat dikerjakan atau dikembangkan lebih lanjut pada kajian berikutnya.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Efisiensi Teoritis

Efisiensi teoritis adalah efisiensi ideal yang dihasilkan oleh *wet scrubber* pada saat proses berlangsung. Efisiensi teoritis didapat berdasarkan perhitungan yang mengacu pada data sekunder hasil penelitian yang telah dilakukan sebelumnya. Menurut Joseph (1998), tipikal efisiensi penyisihan untuk emisi pada *wet scrubber* berkisar antara 80-95%. Penyisihan teoritis adalah emisi hilang atau berhasil diproses pada saat proses absorpsi yang terjadi di *wet scrubber* berlangsung. Penyisihan teoritis didapat berdasarkan perhitungan yang mengacu pada efisiensi teoritis yang didapatkan dari data sekunder yang digunakan.

- Contoh perhitungan emisi output teoritis CO

$$\begin{aligned} Z \text{ (ft)} &= H_{og} \times N_{og} \\ N_{og} &= Z / H_{og} \\ &= 1 / 4,289 \\ &= 0,233 \end{aligned} \tag{4.1}$$

$$\begin{aligned} y_2 &= y_1 / \exp(N_{og}) \\ &= 0,0378 / \exp(0,233) \\ &= 0,0299 \text{ mol/menit} \end{aligned} \tag{4.2}$$

$$\begin{aligned} \text{Output} &= (y_2 \times 10^6 \times R \times T) / \text{Debit gas} \\ &= (0,0299 \times (0,082 \text{ L.atm/mol.Kelvin}) \times 303 \text{ Kelvin}) / \\ &\quad (750 \text{ L/menit}) \\ &= 991,6 \text{ ppm} \end{aligned}$$

- Contoh perhitungan tingkat efisiensi penyisihan emisi teoritis CO

$$\begin{aligned} \text{Removal} &= \text{Input} - \text{Output} \\ &= 1252 \text{ ppm} - 991,6 \text{ ppm} \\ &= 260,4 \text{ ppm} \end{aligned} \tag{4.3}$$

$$\begin{aligned} \% \text{Removal} &= (\text{Removal}/\text{Input}) \times 100\% \\ &= (260,4/1252) \times 100\% \\ &= 21\% \end{aligned} \tag{4.4}$$

Hasil perhitungan selengkapnya dapat dilihat melalui Tabel 4.1 hingga Tabel 4.2 sebagai berikut.

Tabel 4.1 Output Teoritis Rata-Rata Emisi CO

Z (ft)	Hog	Nog	y1	y2	Input (ppm)	Output (ppm)	Removal (ppm)	%Removal
1	4.289	0.233	0.0418	0.0331	1384.2	1096.3	287.9	21%

Tabel 4.2 Output Teoritis Rata-Rata Emisi SO₂

Z (ft)	Hog	Nog	y1	y2	Input (ppm)	Output (ppm)	Removal (ppm)	%Removal
1	1.425	0.702	0.0144	0.0072	478.6	237.3	241.3	50%

4.2 Desain *Wet Scrubber* Teoritis

Tipikal efisiensi penyisihan untuk *wet scrubber* berkisar 80-95% (Cahyonugroho dan Rahmmanto, 2009). Perhitungan dimensi teoritis dilakukan sebagai berikut.

4.2.1 Diameter Kolom Teoritis

Simulasi perhitungan menggunakan sampel emisi SO₂ dengan menggunakan jenis media packing Raschig Ring. Perencanaan diameter teoritis dimulai dengan mencari rasio Lm/Gm terlebih dahulu sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 x_2 &= y_1 - y_2 \\
 &= 0,0144 - 0,0072 \\
 &= 0,0073 \text{ mol/menit}
 \end{aligned} \tag{4.5}$$

$$\begin{aligned}
 (L_m/G_m) &= (y_1 - y_2) / (x_2 - x_1) \\
 &= (0,0144 - 0,0072) / (0,0073 - 0) \\
 &= 1
 \end{aligned} \tag{4.6}$$

Setelah mendapatkan nilai Lm/Gm, substitusikan ke Persamaan 2.15 untuk mendapatkan nilai absis kurva.

$$\begin{aligned}
 (L/G)(\rho_g/\rho_l)^{0,5} &= (L_m/G_m) \times (M_{riq}/29) \times (\rho_g/\rho_l)^{0,5} \\
 &= 1 \times (18/29) \times (2,73/999,56)^{0,5} \\
 &= 0,0032
 \end{aligned} \tag{4.7}$$

Langkah berikutnya adalah menghitung nilai *Pressure Drop* berdasarkan Persamaan 2.16 dengan nilai P sebesar 0,115 dikarenakan ukuran media packing yang dipakai berdiameter 1

inch.

$$\begin{aligned} \text{Pressure Drop} &= 0,115P^{0.7} \\ &= 0,115(1)^{0.7} \\ &= 0,115 \text{ in H}_2\text{O/ft of packing} \end{aligned} \quad (4.8)$$

Dari perhitungan di atas, maka didapatkan nilai ordinat sebesar 0,019. Hasil ordinat kemudian disubstitusikan ke dalam Persamaan 2.17 dengan nilai F sebesar 137 untuk media packing Rashig Ring berdiameter 1 inch. Perhitungan untuk mendapatkan nilai G_f adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} G_f &= \text{Ordinat}^2 F \psi (\mu L)^{0.2} / (\rho_l \rho_g g_c) \\ &= 0,019^2 \times 137 \times 1 (1,8)^{0.2} / (2,73 \times 999,56 \times 9,82) \\ &= 1,82 \text{ kg/m}^2\text{s} \end{aligned} \quad (4.9)$$

Kemudian, mencari G_{aktual} melalui Persamaan 2.17 dengan asumsi $\%V_{\text{flooding}}$ sebesar 50% sebagai berikut.

$$\begin{aligned} G_{\text{aktual}} &= G_f \times \%V_{\text{flooding}} \\ &= 1,82 \times 0,5 \\ &= 0,91 \text{ kg/m}^2\text{s} \end{aligned} \quad (4.10)$$

Diameter bisa didapatkan dengan mensubstitusikan G_{aktual} yang didapat ke dalam Persamaan 2.18 dengan menghitung besar M_{dot} untuk emisi SO_2 terlebih dahulu dan didapatkan hasil sebagai berikut.

$$\begin{aligned} M_{\text{dot}} &= \text{Kecepatan udara} \times \rho_g \times \pi \times r^2 \\ &= 0,146 \text{ kg/s} \end{aligned} \quad (4.11)$$

$$\begin{aligned} D &= [(4(M_{\text{dot}}))/(3,14 \times G_{\text{aktual}})]^{0.5} \\ &= [(4(0,146))/(3,14 \times 0,91)]^{0.5} \\ &= 0,453 \text{ m} \\ &= 45,3 \text{ cm} \end{aligned} \quad (4.12)$$

Dari perhitungan di atas, diameter kolom teoritis yang dapat menyisihkan emisi sebesar SO_2 dengan menggunakan media packing Raschig Ring ialah sebesar 45,3 cm.

4.2.2 Volume Kontak Aktual

Perhitungan volume kontak aktual untuk menyisihkan emisi insinerasi dengan menggunakan media packing Raschig Ring adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \text{Volume kontak} &= (\pi \times D^2 \times Z)/4 \\ &= (\pi \times 0,45^2 \times 0,3)/4 \\ &= 0,048 \text{ m}^3 \end{aligned} \quad (4.13)$$

Berdasarkan perhitungan di atas, maka volume kontak aktual

yang dibutuhkan untuk dapat menyisihkan emisi insinerasi pada *wet scrubber* dengan menggunakan media packing Raschig Ring adalah sebesar 0,048 m³.

4.3 Kondisi Optimum Wet Scrubber di Teknik Lingkungan ITS

4.3.1 Volume Kontak Teoritis

Perhitungan volume kontak teoritis untuk menyisihkan emisi hasil insinerasi dengan menggunakan media packing Raschig Ring adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \text{Volume kontak} &= (\pi \times D^2 \times Z)/4 \\ &= (\pi \times 0,61^2 \times 0,3)/4 \\ &= 0,088 \text{ m}^3 \end{aligned} \quad (4.14)$$

Berdasarkan perhitungan di atas, maka volume kontak teoritis yang dibutuhkan untuk dapat menyisihkan emisi insinerasi SO₂ pada *wet scrubber* dengan menggunakan media packing Raschig Ring adalah sebesar 0,088 m³.

4.3.2 Tinggi Packing Teoritis

Perhitungan tinggi packing teoritis berdasarkan volume kontak teoritis *wet scrubber* di Gedung Teknik Lingkungan ITS untuk mencapai efisiensi penyisihan optimum adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} Z &= (4 \times \text{Vol}) / (\pi \times D_{\text{teoritis}}^2) \\ &= (4 \times 0,088) / (3,14 \times 0,453^2) \\ &= 0,54 \text{ m} \end{aligned} \quad (4.15)$$

Berdasarkan perhitungan di atas, tinggi packing teoritis untuk mencapai efisiensi penyisihan optimum adalah sebesar 0,54 m.

4.3.3 Efisiensi Penyisihan Optimum

Perhitungan efisiensi penyisihan optimum berdasarkan tinggi packing teoritis adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} Z &= N_{\text{og}} \times H_{\text{og}} \\ N_{\text{og}} &= Z / H_{\text{og}} \\ &= 1,81 \text{ ft} / 1,425 \\ &= 1,271 \\ y_2 &= y_1 / \exp(N_{\text{og}}) \end{aligned} \quad (4.16)$$

$$= 0,0144 / \exp(1,271)$$

$$= 0,0041 \text{ mol/menit} \quad (4.17)$$

$$\text{Output} = (y_2 \times 10^6 \times R \times T) / \text{Debit gas}$$

$$= (0,0041 \times (0,082 \text{ L.atm/mol.Kelvin}) \times 303 \text{ Kelvin}) /$$

$$(750 \text{ L/menit})$$

$$= 134,32 \text{ ppm} \quad (4.18)$$

$$\text{Removal} = \text{Input} - \text{Output}$$

$$= 478,6 \text{ ppm} - 134,2 \text{ ppm}$$

$$= 344,28 \text{ ppm} \quad (4.3)$$

$$\% \text{Removal} = (\text{Removal}/\text{Input}) \times 100\%$$

$$= (344,28/478,6) \times 100\%$$

$$= 72\% \quad (4.4)$$

Efisiensi optimum yang dapat dihasilkan *wet scrubber* di Gedung Teknik Lingkungan ITS untuk menyisihkan emisi SO₂ dengan media packing Raschig Ring adalah sebesar 72%. Hasil perhitungan selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 4.3 hingga Tabel 4.6 berikut.

Tabel 4.3 Efisiensi Penyisihan Emisi SO₂ Optimum dengan Media Packing Raschig Ring

V (m ³)	D (m)	Z (m)	Z (ft)	Hog	Nog	y ₁	y ₂	Output (ppm)	Removal (ppm)	%Removal
0.088	0.453	0.54	1.81	1.425	1.271	0.0144	0.0041	134.32	344.28	72%

Tabel 4.4 Efisiensi Penyisihan Emisi SO₂ Optimum dengan Media Packing Pall Ring

V (m ³)	D (m)	Z (m)	Z (ft)	Hog	Nog	y ₁	y ₂	Output (ppm)	Removal (ppm)	%Removal
0.088	0.349	0.92	3.06	1.425	2.147	0.0144	0.0017	55.94	422.66	88%

Tabel 4.5 Efisiensi Penyisihan Emisi CO Optimum dengan Media Packing Raschig Ring

V (m ³)	D (m)	Z (m)	Z (ft)	Hog	Nog	y ₁	y ₂	Output (ppm)	Removal (ppm)	%Removal
0.088	0.564	0.35	1.17	4.289	0.273	0.0418	0.0318	1053.59	330.61	24%

Tabel 4.6 Efisiensi Penyisihan Emisi CO Optimum dengan Media Packing Pall Ring

V (m ³)	D (m)	Z (m)	Z (ft)	Hog	Nog	y ₁	y ₂	Output (ppm)	Removal (ppm)	%Removal
0.088	0.434	0.59	1.98	4.289	0.461	0.0418	0.0263	872.88	511.32	37%

Berdasarkan hasil perhitungan yang ditampilkan pada Tabel 4.3 hingga Tabel 4.6, didapatkan nilai outlet optimum yang dihasilkan *wet scrubber* di Gedung Teknik Lingkungan ITS. Nilai outlet tersebut perlu dibandingkan dengan baku mutu yang ada untuk mengetahui kelayakan output optimum yang dihasilkan. Perbandingan nilai output optimum pada *wet scrubber* di Gedung Teknik Lingkungan ITS dengan Permen LHK RI Nomor 70 Tahun 2016 dapat dilihat pada Tabel 4.7 berikut.

Tabel 4.7 Perbandingan Output Optimum dengan Baku Mutu

Media Packing	Parameter	Batas Maksimum (ppm)	Output Optimum (ppm)
Raschig Ring	SO ₂	80	134.32
	CO	546	1053.59
Pall Ring	SO ₂	80	55.94
	CO	546	872.88

Dilihat dari hasil tersebut, kinerja optimum dari *wet scrubber* di Gedung Teknik Lingkungan ITS dengan menggunakan tinggi packing sebesar 30 cm belum bisa dikatakan layak seutuhnya. Hanya penggunaan media packing Pall Ring untuk menyisihkan emisi SO₂ yang dapat menghasilkan output sesuai dengan baku mutu tersebut. Oleh karena itu, diperlukan peningkatan performa dari *wet scrubber* untuk bisa menghasilkan hasil output yang

layak. Perbaikan tersebut dapat dilakukan dengan cara, diantaranya :

1. Laju Aliran Gas

Mengatur laju aliran gas dapat membantu untuk menghasilkan efisiensi yang lebih tinggi dari sebelumnya. Semakin tinggi laju aliran gas, maka semakin besar sistem dan volume *scrubbing liquid* yang dihasilkan untuk menurunkan emisi gas. Beberapa cara dapat dilakukan untuk mempengaruhi kecepatan aliran gas, diantaranya dengan memperkecil dimensi penampang aliran atau menginjeksikan fluida secara berlawanan arah (Budiman, 2018).

2. Tinggi Packing

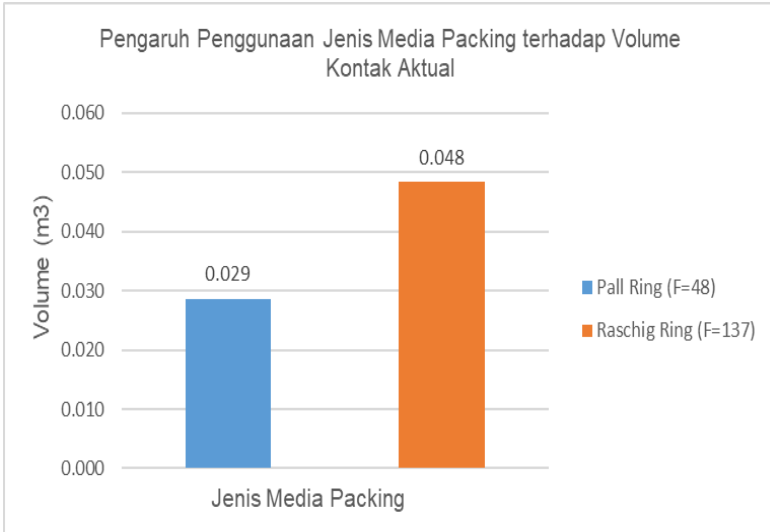
Mengatur tinggi packing dapat mempengaruhi efisiensi yang dihasilkan. Semakin tinggi penggunaan tinggi packing, maka semakin tinggi volume kontak yang dihasilkan sehingga dapat menghasilkan efisiensi penyisihan yang lebih besar.

3. Jumlah dan Ukuran Partikel yang Didistribusikan

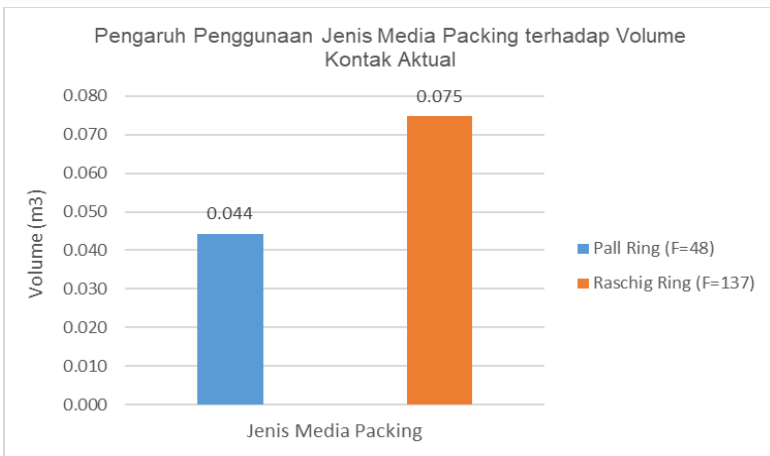
Jumlah dan ukuran partikel atau gas yang didistribusikan pada gas dapat menentukan kemampuan filtrasi dari *wet scrubber*. Kemampuan *wet scrubber* untuk mengurangi jumlah partikel pada bagian keluaran adalah dasar dari penentuan efisiensi dari *wet scrubber* (Haris, 2011).

4.4 Pengaruh Jenis Media Packing terhadap Volume Kontak Aktual

Pengaruh jenis media packing yang digunakan pada *wet scrubber* terhadap volume kontak aktual dapat dilihat pada Gambar 4.1 dan Gambar 4.2 sebagai berikut.



Gambar 4.1 Grafik Pengaruh Penggunaan Jenis Media Packing terhadap Volume Kontak Aktual untuk Emisi SO₂



Gambar 4.2 Grafik Pengaruh Penggunaan Jenis Media Packing terhadap Volume Kontak Aktual untuk Emisi CO

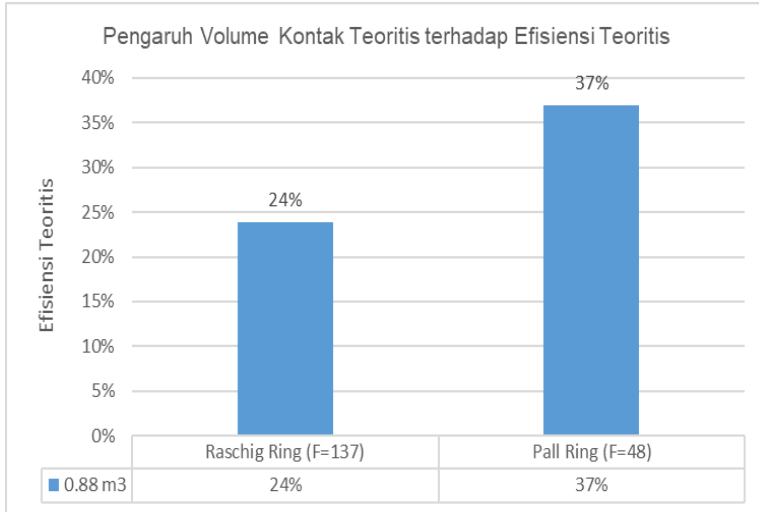
Gambar 4.1 menunjukkan perbandingan antara pengaruh penggunaan jenis media packing dengan volume kontak aktual emisi SO_2 . Dapat dilihat bahwa volume kontak aktual emisi SO_2 terendah yang dihasilkan dengan penggunaan jenis media packing Pall Ring sebesar $0,029 \text{ m}^3$. Sedangkan, volume kontak aktual emisi SO_2 tertinggi dihasilkan dengan penggunaan jenis media packing Raschig Ring sebesar $0,048 \text{ m}^3$.

Pada Gambar 4.2 menunjukkan perbandingan antara pengaruh penggunaan jenis media packing dengan volume kontak aktual emisi CO. Dapat dilihat bahwa volume kontak aktual emisi CO terendah yang dihasilkan dengan penggunaan jenis media packing Pall Ring sebesar $0,044 \text{ m}^3$. Sedangkan, volume kontak teoritis emisi CO tertinggi dihasilkan dengan penggunaan jenis media packing Raschig Ring sebesar $0,075 \text{ m}^3$.

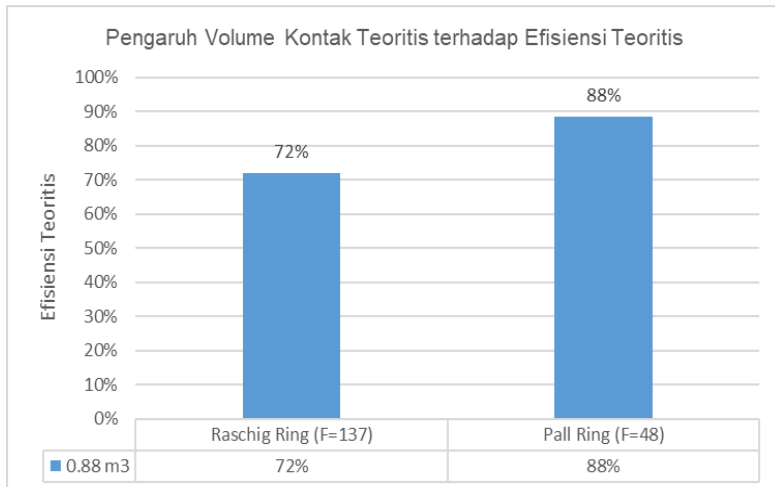
Berdasarkan Gambar 4.1 dan Gambar 4.2 tentang pengaruh penggunaan jenis media packing dengan volume kontak aktual yang dihasilkan, dapat dikatakan bahwa semakin tinggi faktor packing yang berada pada media packing yang digunakan, maka volume kontak yang dihasilkan akan lebih besar. Begitu pula sebaliknya, semakin rendah faktor packing dari jenis media packing yang digunakan, maka volume kontak yang dihasilkan semakin kecil. Hal ini dikarenakan besar faktor packing berbanding lurus terhadap dimensi diameter kolom yang dihasilkan. Besar faktor packing untuk media packing Raschig Ring ialah 137 dan untuk media packing Pall Ring sebesar 48. Oleh karena itu, volume kontak yang dihasilkan dengan menggunakan jenis media Raschig Ring akan lebih besar.

4.5 Pengaruh Volume Kontak Teoritis terhadap Efisiensi Optimum

Pengaruh volume kontak teoritis terhadap efisiensi teoritis yang dihasilkan dapat dilihat pada Gambar 4.3 dan Gambar 4.4 sebagai berikut.



Gambar 4.3 Grafik Pengaruh Volume Kontak Teoritis terhadap Efisiensi Optimum untuk Emisi CO



Gambar 4.4 Grafik Pengaruh Volume Kontak Teoritis terhadap Efisiensi Optimum untuk Emisi SO₂

Gambar 4.3 menunjukkan pengaruh volume kontak teoritis terhadap efisiensi optimum untuk emisi CO. Dapat dilihat bahwa efisiensi optimum terendah yang dihasilkan oleh volume kontak sebesar 0,088 m³ ialah 24% dengan penggunaan media packing Raschig Ring. Sementara, dengan volume kontak yang sama, media packing Pall Ring dapat menghasilkan efisiensi sebesar 37%.

Pada Gambar 4.4 menunjukkan pengaruh volume kontak teoritis terhadap efisiensi optimum untuk emisi SO₂. Dapat dilihat bahwa efisiensi optimum terendah yang dihasilkan oleh volume kontak sebesar 0,088 m³ ialah 72% dengan penggunaan media packing Raschig Ring. Sementara, dengan volume kontak yang sama, media packing Pall Ring dapat menghasilkan efisiensi sebesar 88%.

Berdasarkan Gambar 4.3 dan Gambar 4.4 tentang pengaruh volume kontak teoritis terhadap efisiensi optimum yang dihasilkan, dapat dikatakan bahwa efisiensi tertinggi yang dihasilkan ialah sebesar 88% dengan penggunaan Pall Ring sebagai media packing untuk emisi SO₂. Hal tersebut disebabkan karena gas SO₂ memiliki tingkat kelarutan yang tinggi dalam air yang merupakan absorben daripada gas NO dan CO (Kaye dan Laby, 1986). Menurut Lestari (2004), semakin tinggi luas permukaan kontak yang terbentuk, maka akan sangat mempengaruhi transfer massa dalam sistem. Hal ini diperkuat oleh pernyataan Suryaningtyas (2006) yang menyatakan bahwa volume kontak yang besar akan mempengaruhi luas kontak untuk melakukan proses absorpsi semakin besar sehingga nilai efisiensi akan semakin tinggi, dimana hubungan luas kontak dengan volume kontak ialah berbanding lurus.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan dari kajian pada Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut.

1. Penggunaan jenis media packing berpengaruh pada volume kontak yang dihasilkan pada *wet scrubber*. Penggunaan jenis media packing Pall Ring dapat menghasilkan volume kontak aktual tertinggi sebesar 0,044 m³ dan media packing Raschig Ring menghasilkan volume kontak aktual tertinggi sebesar 0,075 m³ untuk emisi CO. Dari data tersebut, dapat dikatakan bahwa semakin tinggi faktor packing yang ada pada jenis media packing, maka semakin tinggi volume kontak emisi yang akan dihasilkan pada *wet scrubber*.
2. Volume kontak berpengaruh pada efisiensi optimum yang dihasilkan pada *wet scrubber*. Dengan volume kontak teoritis sebesar 0,088 m³, efisiensi penyisihan optimum tertinggi yang dihasilkan ialah sebesar 88% untuk penyisihan emisi SO₂ dengan penggunaan jenis media packing Pall Ring. Hal tersebut disebabkan oleh tingginya nilai kelarutan SO₂ dalam air dibandingkan dengan CO.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan pada Tugas Akhir ini adalah diperlukannya kajian atau penelitian lebih lanjut terkait ukuran droplet dan jumlah atau ukuran partikel yang didistribusikan pada *wet scrubber* khususnya pada aliran *cocurrent*.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

- Abdurrahman, Arief. 2013. "Rancang Bangun Alat Purifikasi Biogas Dengan Menggunakan Cao Dan Water Scrubber". Magister Teknik Fisika, Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
- Ain, L. Q. 2019. "Penurunan Kandungan Emisi Insinerator Sampah Plastik Nonreusable Menggunakan Two Stage Packing Scrubber". Surabaya: Tesis Jurusan Teknik Lingkungan FTSP ITS.
- Bahrin, David Subagjo dan Herri, Susanto. 2015. "Penyusunan Kriteria Pemilihan Proses Flue Gas Desulfurization PLTU-Batubara". *Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia "Kejuangan"*. ISSN 1693-4393
- Bashir, N. H. H. (2013) Plastic Problem in Africa. *Japanese Journal of Veterinary Research*, 61, pp. 1–11.
- Boedisantoso, R. 2003. "Teknologi Pengolahan Pencemar Udara". Jurusan Teknik Lingkungan FTSP ITS. Surabaya.
- Budiman, Arif. 2001. "Modifikasi Desain dan Uji Unjuk Kerja Alat Pembakar Sampah Tipe Batch". Jurusan Teknik Pertanian, Institut Pertanian Bogor. Bogor.
- Budiman, W.N.R.A. 2018. "Perencanaan Emisi PM 10 pada Industri Peleburan Baja Cilegon-Banten". Tugas Akhir Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
- Cahyonugroho, Okik Hendriyanto dan Rahmanto, Tuwu Agung. "Optimasi Kinerja Countercurrent Packed Column Tower dalam Menyisihkan Polutan Udara". Fakultas Teknik Industri & LPPM UPN "Veteran" Jawa Timur.
- Chattopadhyay, P. 2007. "Absorption and Strippin". New Delhi: Asian Books Pvt. Ltd

- Christian, Hans. 2008. "Modifikasi Sistem Burner dan Pengujian Fluideized Bed Incinerator". Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
- Enviromental Protection Agency. 1995. "Wet Scrubber for Acid Gas, Research Triangle Park", *EPA/452/B-02-001*
- Fadly, Nanguning Tri. 2014. "Menentukan Konsentrasi NaOH sebagai Penyerap CO₂ dari Proses Pembakaran Limbah Infeksius di dalam Insinerator Metode Primary dan Secondary Chamber". Tugas Akhir Politeknik Sriwijaya. Palembang.
- Haris, A. 2011. "Penurunan Debu Padi Menggunakan Wet Scrubber". Tesis Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
- Jambeck, JR, R. Geyer, C. Wilcox, TR. Siegler, M. Perryman, A. Andrady, R. Narayan. 2015. "Plastic Waste Inputs from Land into The Ocean". *Journal of Science*. 347: 768-771
- Joseph, Gerald T. Beachler, David S,. 1998. "Scrubber Systems Operation Review Self-Instructional Manual APTI Course SI:412C Second Edition". North Carolina State University: United States of America.
- Kaye, G.W.C dan Laby, T.H. 1986. "Tables of Physical and Chemical Constants 15th ed". Longman, NY, p.219.
- Khairumizan, Panji. 2008. "Studi Eksperimental Implementasi Venturi Scrubber pada Sistem Gasifikasi Batubara". Skripsi Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Depok.
- Kencanawati, Martheana. 2007. "Studi Kemampuan Spray Tower untuk Penyisihan Polutan Gas dari Pembakaran Bahan Bakar Industri". Surabaya: Departemen Teknik Lingkungan ITS.
- Lestari. (2004). "Air Pollution Control Technology for Gaseous and Particulate Emission". Modified and Developed from APTI

413 and 415. Depart of Environmental Engineering-ITB. Indonesia.

- Maryanto, Dicky, Mulasari, S.A., Suryani, Dyah. 2009. "Penurunan Kadar Emisi Gas Buang Karbon Monoksida (CO) dengan Penambahan Arang Aktif pada Kendaraan Bermotor di Yogyakarta". *Jurnal Kesehatan Masyarakat*. Vol. 3 No.3 Hal. 162-232
- McCabe, W.L., Smith, J.C., Harriott, P. 1993. "Unit Operations of Chemical Engineering 5th Edition". *McGraw-Hill Book Co.* New York
- Mycook, J.C., McKenna, J.D., Theodore, Louis. 1995. "Air Pollution Control Engineering 5th Edition". *McGraw-Hill Book Co.* New York
- Nelms, SE., EM. Duncan, AC. Broderick, TS. Galloway, MH. Godfrey, M. Hamann, PK. Lindeque, BJ. Godley. 2015. "Plastic and Marine Turtles: A Review and Call for Research". *ICES Journal of Marine Science*.
- Peraturan Pemerintah Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor P.70/Menlhk/Setjen/Kum.1/8/2016 tentang baku mutu emisi usaha atau kegiatan pengolahan sampah secara termal.
- Pohan, Nurhasmawaty. 2002. "Pencemaran Udara dan Hujan Asam". Program Studi Teknik Kimia, Universitas Sumatera Utara. Medan.
- Pradani, Yulanda Kurnia. 2020. "Kajian Penurunan Emisi dengan Menggunakan Venturi Vacuum pada Sistem Three-Stage Filter Wet Scrubber". Tesis Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Purnamasari, Rina, Sumardi, dan Wahyudi. 2011. "Perancangan Driver Katup (Control Valve) untuk Pengaturan Temperatur Incenerator dengan Sistem Kendali PI".

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Diponegoro. Semarang.

- Purwaningrum, Pramiati. 2016. "Upaya Mengurangi Timbulan Sampah Plastik di Lingkungan". *Jurnal Teknik Lingkungan*. Vol. 8 No.2 Hal. 141-147.
- Putra, Angga Purnama. 2010. "Pengaruh Variasi Laju Aliran Air pada Venturi Scrubber terhadap Reduksi Tar dan Bentuk Flame pada Sistem Gasifikasi Biomassa". Skripsi Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Depok.
- Rostika, Rufaida Nur. 2011. "Biofiksasi CO₂ Oleh Mikroalga *Chlamydomonas Sp* Untuk Pemurnian Biogas". Magister Teknik Kimia, Universitas Diponegoro. Semarang.
- Spellman, Frank R. dan Whitting, Nancy E. 2005. *Environmental Engineer's Mathematics Handbook*. USA: CRC Press LLC.
- Suryaningtyas, N. 2006. "Studi untuk Kerja Wet Scrubber Untuk Penyisihan Gas SO_x dan Pengaruhnya terhadap Nilai pH Absorbent". Tugas Akhir. Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya.
- Trihadiningrum, Yulinah. 2016. "Pengolahan Limbah Bahan Bahaya dan Beracun (B3)". Teknosain : Yogyakarta.
- Zhang, Q., Tie, X. 2011. "High solubility of SO₂: evidence in an intensive fog event measured in the NCP region, China". *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*. 11:2931–2947.

BIOGRAFI PENULIS



Penulis lahir di Jakarta pada tanggal 25 Desember 1997. Sehari-hari, penulis akrab disapa dengan panggilan Farhan atau Azizi. Penulis sudah menajaki pendidikan wajibnya dimulai dari TK Sumbangsih (2001-2003), SD Sumbangsih (2003-2004), SD Dwi Matra (2004-2009), SMPN 85 Jakarta (2009-2012), dan SMAN 6 Jakarta (2012-2015). Penulis kemudian melanjutkan pendidikan S1 pada tahun 2016 di Departemen Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumihan, ITS, Surabaya. Penulis memiliki ketertarikan terhadap olah raga.

Selama masa perkuliahan, penulis aktif di Himpunan Mahasiswa Teknik Lingkungan (HMTL) pada tahun 2017–2020 dan Ikatan Mahasiswa Teknik Lingkungan Indonesia (IMTLI) pada tahun 2018-2020. Selama berkecimpung di organisasi HMTL, penulis mengawalinya sebagai staf hingga menjadi Kepala Bidang di Departemen Kesejahteraan Mahasiswa (Kesma) dan pada IMTLI sebagai Kepala Departemen Media dan Relasi (Medres). Selain itu, penulis pernah berkesempatan melakukan magangkerja praktek di PT.Petrokimia Gresik pada bagian HSE (Health, Safety, Environment). Penulis berharap dengan kajian ini dapat memberi ilmu dan alternatif pada pengembangan alat *wet scrubber* yang dapat menjadi solusi untuk menyisihkan emisi gas. Penulis berharap apabila ada saran dan kritik yang membangun diharapkan dapat mengirimkannya via email, yaitu azizifarhan10@gmail.com.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN

I. Perhitungan H_{og} dan N_{og} Penelitian Sebelumnya

$$\begin{aligned} Z &= 30 \text{ cm} \\ &= 1 \text{ ft} \end{aligned}$$

$$N_{og} = \ln (y_1/y_2)$$

$$H_{og} = Z/N_{og}$$

Emisi SO_2

Menit ke-	Z (ft)	Hog	Nog
1	1	1.425	0.702
2	1	1.425	0.702
3	1	1.425	0.702
4	1	1.425	0.702
5	1	1.425	0.702
6	1	1.425	0.702
7	1	1.425	0.702
8	1	1.425	0.702
9	1	1.425	0.702
10	1	1.425	0.702
Rata-rata	1	1.425	0.702

Emisi CO

Menit ke-	Z (ft)	Hog	Nog
1	1	4.289	0.233
2	1	4.289	0.233
3	1	4.289	0.233
4	1	4.289	0.233
5	1	4.289	0.233
6	1	4.289	0.233
7	1	4.289	0.233
8	1	4.289	0.233
9	1	4.289	0.233
10	1	4.289	0.233
Rata-rata	1	4.289	0.233

II. Perhitungan Output Teoritis

Output Teoritis Emisi SO₂

Menit ke-	Z (ft)	Hog	Nog	y1	y2	Input (ppm)	Output (ppm)	Removal (ppm)	%Removal
1	1	1.425	0.702	0.0174	0.0087	578	286.6	291.4	50%
2	1	1.425	0.702	0.0195	0.0097	646	320.3	325.7	50%
3	1	1.425	0.702	0.0161	0.0080	535	265.3	269.7	50%
4	1	1.425	0.702	0.0129	0.0064	427	211.7	215.3	50%
5	1	1.425	0.702	0.0173	0.0086	574	284.6	289.4	50%
6	1	1.425	0.702	0.0207	0.0103	686	340.1	345.9	50%
7	1	1.425	0.702	0.0161	0.0080	532	263.8	268.2	50%
8	1	1.425	0.702	0.0116	0.0057	383	189.9	193.1	50%
9	1	1.425	0.702	0.0081	0.0040	269	133.4	135.6	50%
10	1	1.425	0.702	0.0047	0.0023	156	77.3	78.7	50%
Rata-rata	1	1.425	0.702	0.0144	0.0072	478.6	237.3	241.3	50%

Output Teoritis Emisi CO

Menit ke-	Z (ft)	Hog	Nog	y1	y2	Input (ppm)	Output (ppm)	Removal (ppm)	%Removal
1	1	4.289	0.233	0.0378	0.0299	1252	991.6	260.4	21%
2	1	4.289	0.233	0.0400	0.0317	1326	1050.2	275.8	21%
3	1	4.289	0.233	0.0419	0.0332	1389	1100.1	288.9	21%
4	1	4.289	0.233	0.0419	0.0332	1389	1100.1	288.9	21%
5	1	4.289	0.233	0.0429	0.0340	1422	1126.2	295.8	21%
6	1	4.289	0.233	0.0505	0.0400	1673	1325.0	348.0	21%
7	1	4.289	0.233	0.0472	0.0374	1564	1238.7	325.3	21%
8	1	4.289	0.233	0.0434	0.0344	1438	1138.9	299.1	21%
9	1	4.289	0.233	0.0381	0.0302	1263	1000.3	262.7	21%
10	1	4.289	0.233	0.0340	0.0269	1126	891.8	234.2	21%
Rata-rata	1	4.289	0.233	0.0418	0.0331	1384.2	1096.3	287.9	21%

III. Perhitungan Diameter Kolom Teoritis

Variasi T1;M1 Emisi SO₂

Menit ke-	Input (ppm)	Output (ppm)	Removal (ppm)	%Removal	y ₁	y ₂	x ₁	x ₂	(Lm/Gm)	L/G (P/Pg) ^{0.5}	Pressure Drop (in)	Gf	Grr	Srr	Drr
1	578	286.6	291.4	50%	0.0174	0.0087	0	0.0088	1.00	0.0324	0.115	0.019	0.909	0.161	0.453
2	646	320.3	325.7	50%	0.0195	0.0097	0	0.0098	1.00	0.0324	0.115	0.019	0.909	0.161	0.453
3	535	265.3	269.7	50%	0.0161	0.0080	0	0.0081	1.00	0.0324	0.115	0.019	0.909	0.161	0.453
4	427	211.7	215.3	50%	0.0129	0.0064	0	0.0065	1.00	0.0324	0.115	0.019	0.909	0.161	0.453
5	574	284.6	289.4	50%	0.0173	0.0086	0	0.0087	1.00	0.0324	0.115	0.019	0.909	0.161	0.453
6	686	340.1	345.9	50%	0.0207	0.0103	0	0.0104	1.00	0.0324	0.115	0.019	0.909	0.161	0.453
7	532	263.8	268.2	50%	0.0161	0.0080	0	0.0081	1.00	0.0324	0.115	0.019	0.909	0.161	0.453
8	383	189.9	193.1	50%	0.0116	0.0057	0	0.0058	1.00	0.0324	0.115	0.019	0.909	0.161	0.453
9	269	133.4	135.6	50%	0.0081	0.0040	0	0.0041	1.00	0.0324	0.115	0.019	0.909	0.161	0.453
10	156	77.3	78.7	50%	0.0047	0.0023	0	0.0024	1.00	0.0324	0.115	0.019	0.909	0.161	0.453
Rata-rata	478.6	237.3	241.3	50%	0.0144	0.0072	0	0.0073	1.00	0.0324	0.115	0.019	0.909	0.161	0.453

Variasi T1;M1 Emisi CO

Menit ke-	Input (ppm)	Output (ppm)	Removal (ppm)	%Removal	y ₁	y ₂	x ₁	x ₂	(Lm/Gm)	L/G (P/Pg) ^{0.5}	Pressure Drop (in)	Gf	Grr	Srr	Drr
1	1252	991.6	260.4	21%	0.0378	0.0299	0	0.0079	1.00	0.0210	0.115	0.019	0.588	0.250	0.564
2	1326	1050.2	275.8	21%	0.0400	0.0317	0	0.0083	1.00	0.0210	0.115	0.019	0.588	0.250	0.564
3	1389	1100.1	288.9	21%	0.0419	0.0332	0	0.0087	1.00	0.0210	0.115	0.019	0.588	0.250	0.564
4	1389	1100.1	288.9	21%	0.0419	0.0332	0	0.0087	1.00	0.0210	0.115	0.019	0.588	0.250	0.564
5	1422	1126.2	295.8	21%	0.0429	0.0340	0	0.0089	1.00	0.0210	0.115	0.019	0.588	0.250	0.564
6	1673	1325.0	348.0	21%	0.0505	0.0400	0	0.0105	1.00	0.0210	0.115	0.019	0.588	0.250	0.564
7	1564	1238.7	325.3	21%	0.0472	0.0374	0	0.0098	1.00	0.0210	0.115	0.019	0.588	0.250	0.564
8	1438	1138.9	299.1	21%	0.0434	0.0344	0	0.0090	1.00	0.0210	0.115	0.019	0.588	0.250	0.564
9	1263	1000.3	262.7	21%	0.0381	0.0302	0	0.0079	1.00	0.0210	0.115	0.019	0.588	0.250	0.564
10	1126	891.8	234.2	21%	0.0340	0.0269	0	0.0071	1.00	0.0210	0.115	0.019	0.588	0.250	0.564
Rata-rata	1384.2	1096.3	287.9	21%	0.0418	0.0331	0	0.0087	1.00	0.0210	0.115	0.019	0.588	0.250	0.564

Variasi T1;M2 Emisi SO₂

Menit ke-	Input (ppm)	Output (ppm)	Removal (ppm)	%Removal	y1	y2	x1	x2	(Lm/Gm)	L/G (P/Pg)*0.5	Pressure Drop (in)	Gf	Gpr	Spr	Dpr
1	578	286.6	291.4	50%	0.0174	0.0087	0	0.0088	1.00	0.0324	0.115	0.019	1.5360	0.0955	0.349
2	646	320.3	325.7	50%	0.0195	0.0097	0	0.0098	1.00	0.0324	0.115	0.019	1.5360	0.0955	0.349
3	535	265.3	269.7	50%	0.0161	0.0080	0	0.0081	1.00	0.0324	0.115	0.019	1.5360	0.0955	0.349
4	427	211.7	215.3	50%	0.0129	0.0064	0	0.0065	1.00	0.0324	0.115	0.019	1.5360	0.0955	0.349
5	574	284.6	289.4	50%	0.0173	0.0086	0	0.0087	1.00	0.0324	0.115	0.019	1.5360	0.0955	0.349
6	686	340.1	345.9	50%	0.0207	0.0103	0	0.0104	1.00	0.0324	0.115	0.019	1.5360	0.0955	0.349
7	532	263.8	268.2	50%	0.0161	0.0080	0	0.0081	1.00	0.0324	0.115	0.019	1.5360	0.0955	0.349
8	383	189.9	193.1	50%	0.0116	0.0057	0	0.0058	1.00	0.0324	0.115	0.019	1.5360	0.0955	0.349
9	269	133.4	135.6	50%	0.0081	0.0040	0	0.0041	1.00	0.0324	0.115	0.019	1.5360	0.0955	0.349
10	156	77.3	78.7	50%	0.0047	0.0023	0	0.0024	1.00	0.0324	0.115	0.019	1.5360	0.0955	0.349
Rata-rata	478.6	237.3	241.3	50%	0.0144	0.0072	0	0.0073	1.00	0.0324	0.115	0.019	1.5360	0.0955	0.349

Variasi T1;M2 Emisi CO

Menit ke-	Input (ppm)	Output (ppm)	Removal (ppm)	%Removal	y1	y2	x1	x2	(Lm/Gm)	L/G (P/Pg)*0.5	Pressure Drop (in)	Gf	Gpr	Spr	Dpr
1	1252	991.6	260.4	21%	0.0378	0.0299	0	0.0079	1.00	0.0210	0.115	0.019	0.993	0.148	0.434
2	1326	1050.2	275.8	21%	0.0400	0.0317	0	0.0083	1.00	0.0210	0.115	0.019	0.993	0.148	0.434
3	1389	1100.1	288.9	21%	0.0419	0.0332	0	0.0087	1.00	0.0210	0.115	0.019	0.993	0.148	0.434
4	1389	1100.1	288.9	21%	0.0419	0.0332	0	0.0087	1.00	0.0210	0.115	0.019	0.993	0.148	0.434
5	1422	1126.2	295.8	21%	0.0429	0.0340	0	0.0089	1.00	0.0210	0.115	0.019	0.993	0.148	0.434
6	1673	1325.0	348.0	21%	0.0505	0.0400	0	0.0105	1.00	0.0210	0.115	0.019	0.993	0.148	0.434
7	1564	1238.7	325.3	21%	0.0472	0.0374	0	0.0098	1.00	0.0210	0.115	0.019	0.993	0.148	0.434
8	1438	1138.9	299.1	21%	0.0434	0.0344	0	0.0090	1.00	0.0210	0.115	0.019	0.993	0.148	0.434
9	1263	1000.3	262.7	21%	0.0381	0.0302	0	0.0079	1.00	0.0210	0.115	0.019	0.993	0.148	0.434
10	1126	891.8	234.2	21%	0.0340	0.0269	0	0.0071	1.00	0.0210	0.115	0.019	0.993	0.148	0.434
Rata-rata	1384.2	1096.3	287.9	21%	0.0418	0.0331	0	0.0087	1.00	0.0210	0.115	0.019	0.993	0.148	0.434

IV. Perhitungan Volume Kontak Aktual

T1:M1 Emisi SO₂

Menit ke-	D (m)	Z (m)	V (m3)
1	0.453	0.3	0.048
2	0.453	0.3	0.048
3	0.453	0.3	0.048
4	0.453	0.3	0.048
5	0.453	0.3	0.048
6	0.453	0.3	0.048
7	0.453	0.3	0.048
8	0.453	0.3	0.048
9	0.453	0.3	0.048
10	0.453	0.3	0.048

T1:M1 Emisi CO

Menit ke-	D (m)	Z (m)	V (m3)
1	0.349	0.3	0.029
2	0.349	0.3	0.029
3	0.349	0.3	0.029
4	0.349	0.3	0.029
5	0.349	0.3	0.029
6	0.349	0.3	0.029
7	0.349	0.3	0.029
8	0.349	0.3	0.029
9	0.349	0.3	0.029
10	0.349	0.3	0.029

T1;M2 Emisi SO₂

Menit ke-	D (m)	Z (m)	V (m3)
1	0.564	0.3	0.075
2	0.564	0.3	0.075
3	0.564	0.3	0.075
4	0.564	0.3	0.075
5	0.564	0.3	0.075
6	0.564	0.3	0.075
7	0.564	0.3	0.075
8	0.564	0.3	0.075
9	0.564	0.3	0.075
10	0.564	0.3	0.075

T1;M2 Emisi CO

Menit ke-	D (m)	Z (m)	V (m3)
1	0.434	0.3	0.044
2	0.434	0.3	0.044
3	0.434	0.3	0.044
4	0.434	0.3	0.044
5	0.434	0.3	0.044
6	0.434	0.3	0.044
7	0.434	0.3	0.044
8	0.434	0.3	0.044
9	0.434	0.3	0.044
10	0.434	0.3	0.044

V. Perhitungan Tinggi Packing Teoritis

Media Packing Raschig Ring untuk Emisi SO₂

Menit ke-	V (m3)	D (m)	Z (m)
1	0.880	0.453	0.543
2	0.880	0.453	0.543
3	0.880	0.453	0.543
4	0.880	0.453	0.543
5	0.880	0.453	0.543
6	0.880	0.453	0.543
7	0.880	0.453	0.543
8	0.880	0.453	0.543
9	0.880	0.453	0.543
10	0.880	0.453	0.543

Media Packing Raschig Ring untuk Emisi CO

Menit ke-	V (m3)	D (m)	Z (m)
1	0.880	0.564	0.351
2	0.880	0.564	0.351
3	0.880	0.564	0.351
4	0.880	0.564	0.351
5	0.880	0.564	0.351
6	0.880	0.564	0.351
7	0.880	0.564	0.351
8	0.880	0.564	0.351
9	0.880	0.564	0.351
10	0.880	0.564	0.351

Media Packing Pall Ring untuk Emisi SO₂

Menit ke-	V (m3)	D (m)	Z (m)
1	0.880	0.349	0.918
2	0.880	0.349	0.918
3	0.880	0.349	0.918
4	0.880	0.349	0.918
5	0.880	0.349	0.918
6	0.880	0.349	0.918
7	0.880	0.349	0.918
8	0.880	0.349	0.918
9	0.880	0.349	0.918
10	0.880	0.349	0.918

Media Packing Pall Ring untuk Emisi CO

Menit ke-	V (m3)	D (m)	Z (m)
1	0.880	0.434	0.593
2	0.880	0.434	0.593
3	0.880	0.434	0.593
4	0.880	0.434	0.593
5	0.880	0.434	0.593
6	0.880	0.434	0.593
7	0.880	0.434	0.593
8	0.880	0.434	0.593
9	0.880	0.434	0.593
10	0.880	0.434	0.593