



TESIS - RE 185401

KAJIAN PENURUNAN EMISI DENGAN MENGGUNAKAN  
*VENTURI VACUUM* PADA SISTEM *THREE-STAGE FILTER*  
*WET SCRUBBER*

YULANDA KURNIA PRADANI  
03211750012007

DOSEN PEMBIMBING  
Dr. Ir. Rachmat Boedisantoso, M.T

DOSEN Co-PEMBIMBING  
Dr. Abdu Fadli Assomadi, S.Si., M.T

DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN  
FAKULTAS TEKNIK SIPIL, PERENCANAAN, DAN KEBUMIHAN  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2020



TESIS - RE 185401

**KAJIAN PENURUNAN EMISI DENGAN MENGGUNAKAN  
VENTURI VACUUM PADA SISTEM *THREE-STAGE FILTER*  
*WET SCRUBBER***

**YULANDA KURNIA PRADANI  
03211750012007**

**DOSEN PEMBIMBING  
Dr. Ir. Rachmat Boedisantoso, M.T**

**DOSEN Co-PEMBIMBING  
Dr. Abdu Fadli Assomadi, S.Si., M.T**

**DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN  
FAKULTAS TEKNIK SIPIL, PERENCANAAN, DAN KEBUMIHAN  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2020**



THESIS - RE 185401

# STUDY OF REDUCTION OF EMISSIONS USING VENTURI VACUUM IN THE THREE-STAGE FILTER WET SCRUBBER SYSTEM

YULANDA KURNIA PRADANI  
03211750012007

SUPERVISOR  
Dr. Ir. Rachmat Boedisantoso, M.T

Co-SUPERVISOR  
Dr. Abdu Fadli Assomadi, S.Si., M.T

DEPARTEMENT OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING  
FACULTY OF CIVIL, PLANNING, AND GEO ENGINEERING  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2020

# LEMBAR PENGESAHAN TESIS

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar  
**Magister Teknik (MT)**

di

**Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Oleh:

**YULANDA KURNIA PRADANI**

**NRP: 03211750012007**

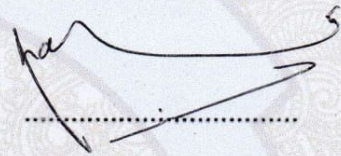
Tanggal Ujian: 06 Januari 2020

Periode Wisuda: Maret 2020

Disetujui oleh:


**Pembimbing:**

1. Dr. Ir. Rachmat Boedisantoso, M.T  
NIP: 19660116 199703 1 001



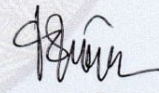
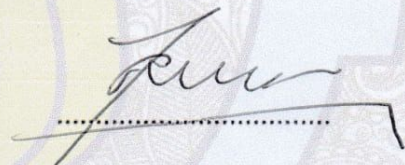
**Co-Pembimbing:**

2. Dr. Abdu Fadli Assomadi, S.Si., M.T  
NIP: 19751018 200501 1 003



**Penguji:**

1. Dr. Ir. R. Irwan Bagyo Santoso, M.T  
NIP: 19650508 199303 1 001
2. Bieby Voijant Tangahu, S.T., M.T., Ph.D  
NIP: 19710818 199703 2 001
3. Ervin Nurhayati, S.T., M.T., Ph.D  
NIP: 1980201712041



Kepala Departemen Teknik Lingkungan  
Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumihan



Dr. Eng. Arie Dipareza Syafei, S.T., MEPM  
NIP: 19820119 200501 1 001

## **KAJIAN PENURUNAN EMISI DENGAN MENGGUNAKAN *VENTURI VACUUM* PADA SISTEM *THREE-STAGE FILTER WET SCRUBBER***

Nama Mahasiswa : Yulanda Kurnia Pradani  
NRP : 03211750012007  
Pembimbing : Dr. Ir. Rachmat Boedisantoso, M.T.  
Co-Pembimbing : Dr. Abdu Fadli Assomadi, S.Si., M.T.

### **ABSTRAK**

Emisi gas hasil dari pembakaran *incinerator* perlu dilakukan pengendalian untuk mencegah terjadinya pencemaran udara. Salah satu alat untuk menurunkan emisi gas tersebut dengan menggunakan *venturi vacuum* pada sistem *three-stage filter wet scrubber*. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui ada tidaknya pengaruh dari jumlah *venturi vacuum*, ukuran media filter, dan tinggi media filter.

Media filter yang digunakan pada penelitian yaitu pipa PVC dengan ukuran media filter divariasikan 2 cm, 4 cm, dan 6 cm. Tinggi media filter divariasikan 5 cm, 10 cm, dan 15 cm. Parameter yang diteliti adalah emisi gas NO, CO, dan SO<sub>2</sub>. Data hasil dari penelitian dilakukan uji statistik dengan menggunakan *One-way Anova* untuk mengetahui hubungan dari pengaruh variabel dan parameter terhadap efisiensi dari reaktor *three-stage filter wet scrubber*.

Hasil penelitian menggunakan reaktor *no venturi vacuum* didapatkan nilai efisiensi tertinggi sebesar 58,33% (NO), 28,85% (CO), dan 59,32% (SO<sub>2</sub>). Pada reaktor *single venturi vacuum* didapatkan nilai efisiensi tertinggi sebesar 66,67% (NO), 29,69% (CO), dan 66,87% (SO<sub>2</sub>). Pada reaktor *double venturi vacuum* didapatkan nilai efisiensi tertinggi sebesar 55% (NO), 20,85% (CO), dan 64% (SO<sub>2</sub>). Pengaruh reaktor dengan menggunakan *single venturi vacuum* terhadap efisiensi reaktor *wet scrubber* mempunyai nilai efisiensi yang paling tinggi.

**Kata kunci:** emisi, *three-stage filter wet scrubber*, *venturi vacuum*, media filter, efisiensi

**“Halaman ini sengaja dikosongkan”**

***STUDY OF EMISSION DECREASE USING VENTURI VACUUM IN  
THREE-STAGE FILTER WET SCRUBBER SYSTEMS***

Student Name : Yulanda Kurnia Pradani  
Student ID number : 03211750012007  
Supervisor : Dr. Ir. Rachmat Boedisantoso, M.T.  
Co- Supervisor : Dr. Abdu Fadli Assomadi, S.Si., M.T.

**ABSTRACT**

Control of gas emissions from incinerator combustion needs to be done to prevent air pollution. One of the tools to reduce gas emissions is by using a venturi vacuum in a wet scrubber three-stage filter system. This research was conducted to determine whether there is an influence of the number of venturi vacuum, filter media size, and filter media height.

The filter media that used are PVC pipes with filter media sizes varying 2 cm, 4 cm and 6 cm. The height of the filter media varies 5 cm, 10 cm and 15 cm. The parameters studied were NO, CO, and SO<sub>2</sub> gas emissions. Result data from the study was carried out statistical tests using One-way Anova to determine the relationship of the influence of variables and parameters on the efficiency of the wet scrubber three-stage filter reactor.

The results of the study using a no venturi vacuum reactor obtained the highest efficiency values of 58,33% (NO), 28,85% (CO), and 59,32% (SO<sub>2</sub>). In the single venturi vacuum reactor, the highest efficiency value was 66,67% (NO), 29,69% (CO), and 66,87% (SO<sub>2</sub>). In the double venturi vacuum reactor, the highest efficiency values were 55% (NO), 20,85% (CO), and 64% (SO<sub>2</sub>). The effect of the reactor using a single venturi vacuum on the efficiency of the wet scrubber reactor has the highest efficiency value.

**Keywords:** emission, *three-stage wet scrubber filter*, *venturi vacuum*, filter media, efficiency

**“Halaman ini sengaja dikosongkan”**



## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas rahmat, ridho, dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan penelitian tesis berjudul “Kajian Penurunan Emisi dengan Menggunakan *Venturi Vacuum* pada Sistem *Three-Stage Filter Wet Scrubber*” yang merupakan salah satu persyaratan akademik untuk menyelesaikan pendidikan Magister Teknik di Jurusan Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumihan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya. Pengerjaan tesis ini, telah banyak pihak yang ikut serta dalam memberikan bantuan dan dukungan kepada penulis sehingga laporan tesis ini dapat diselesaikan. Pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada berbagai pihak yang telah membantu dalam penyelesaian tesis ini, antara lain kepada:

1. Bapak Dr. Ir. Rachmat Boedisantoso, M.T selaku dosen pembimbing yang telah sabar membimbing, memberikan ilmu dan pengarahan serta memberikan motivasi kepada penulis selama pengerjaan tesis ini.
2. Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat ITS melalui program Hibah Penelitian Dana Lokal ITS 2018 yang telah mendanai pelaksanaan penelitian.
3. Bapak Dr. Eng. Arie Dipareza Syafei, S.T., MEPM selaku kepala departemen Teknik Lingkungan Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
4. Bapak Dr. Abdu Fadli Assomadi, S.Si, M.T., Bapak Dr. Ir. R. Irwan Bagyo Santoso, M.T., Ibu Bieby Voijant Tangahu, S.T., M.T., Ph.D, serta Ibu Ervin Nurhayati S.T., M.T., Ph.D selaku dosen pengarah dalam pengerjaan tesis ini.
5. Bapak Mohamad Affan Samudra selaku laboran dari Laboratorium Pengendalian Pencemaran Udara dan Perubahan Iklim Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
6. Kedua orang tua penulis yang sangat penulis sayangi yaitu Ibu Suci Rahayu dan Bapak Daeng Hadi Supanto, terima kasih atas setiap kasih sayang, doa dan pengorbanannya selama ini.
7. Adik penulis Muhammad Isna Kurniawan satu-satunya saudara kandung penulis yang selalu memberikan motivasi, perhatian, dan doa kepada penulis.

8. Teman seperjuangan Shofiana Istiqomah yang selalu memberikan perhatian dan bantuan selama pengerjaan tesis.
9. Adik-adik *air project* Dinia, Cantika, Munif, Rahardian, Fendy, Annisa, Asri, dan Farhan yang telah banyak berkorban membantu pelaksanaan penelitian sampai selesai.
10. Teman-teman pascasarjana Teknik Lingkungan ITS 2017-2018 dan teman-teman Teknik Lingkungan Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Yogyakarta 2013 atas doa, kerja sama dan dukungannya.

Penulisan tesis ini masih jauh dari kesempurnaan, dikarenakan keterbatasan ilmu yang penulis miliki. Penulis mengharapkan saran dan kritik yang membangun untuk perbaikan laporan tesis ini. Semoga laporan tesis ini dapat bermanfaat bagi pembaca. Terima kasih.

Surabaya, 20 Januari 2020

Penulis

## DAFTAR ISI

ABSTRAK .....	i
ABSTRACT .....	iii
KATA PENGANTAR .....	v
DAFTAR ISI .....	vii
DAFTAR GAMBAR .....	xi
DAFTAR TABEL .....	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	2
1.3 Tujuan Penelitian .....	2
1.4 Manfaat Penelitian .....	3
1.5 Ruang Lingkup .....	4
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA	
2.1 <i>Incinerator</i> .....	5
2.1.1 Sampah Plastik .....	5
2.1.2 Proses Pembakaran .....	8
2.1.3 Komponen Emisi <i>Incinerator</i> .....	8
2.2 Penurunan Emisi .....	11
2.2.1 Absorpsi .....	11
2.2.2 Transfer Massa .....	12
2.2.3 Kelarutan Gas .....	14
2.3 <i>Wet Scrubber</i> .....	16
2.3.1 Media Filter .....	17
2.3.2 <i>Venturi Vacuum</i> .....	19
2.3.3 Keunggulan dan Kelemahan <i>Wet Scrubber</i> .....	21
2.4 Baku Mutu .....	22
2.5 Penelitian Terdahulu .....	23
BAB 3 METODE PENELITIAN	
3.1 Kerangka Penelitian .....	27

3.2	Metode Penelitian .....	28
3.3	Studi Literatur .....	29
3.4	Persiapan Penelitian.....	29
	3.4.1 Persiapan Alat dan Bahan .....	31
3.5	Uji Pendahuluan.....	33
3.6	Pelaksanaan Penelitian.....	34
	3.6.1 Variasi Variabel Penelitian .....	34
	3.6.2 Prosedur Penelitian .....	34
3.7	Pengukuran Parameter Penelitian .....	35
3.8	Analisis Data dan Pembahasan .....	36
3.9	Kesimpulan dan Saran .....	37
<b>BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN</b>		
4.1	Nilai Emisi Gas Hasil Percobaan Penelitian.....	39
	4.1.1 Nilai Emisi pada Reaktor <i>No Venturi Vacuum</i> .....	40
	4.1.2 Nilai Emisi pada Reaktor <i>Single Venturi Vacuum</i> .....	43
	4.1.3 Nilai Emisi pada Reaktor <i>Double Venturi Vacuum</i> .....	45
4.2	Pengaruh Variabel Jumlah <i>Venturi</i> .....	48
	4.2.1 Efisiensi Jumlah <i>Venturi</i> dengan Tinggi Media 5 cm .....	48
	4.2.2 Efisiensi Jumlah <i>Venturi</i> dengan Tinggi Media 10 cm .....	50
	4.2.3 Efisiensi Jumlah <i>Venturi</i> dengan Tinggi Media 15 cm .....	52
4.3	Pengaruh Variabel Ukuran Media Filter.....	55
	4.3.1 Efisiensi Ukuran Media dengan <i>No Venturi Vacuum</i> .....	55
	4.3.2 Efisiensi Ukuran Media dengan <i>Single Venturi Vacuum</i> .....	57
	4.3.3 Efisiensi Ukuran Media dengan <i>Double Venturi Vacuum</i> .....	58
4.4	Pengaruh Variabel Tinggi Media.....	61
	4.4.1 Efisiensi Tinggi Media dengan <i>No Venturi Vacuum</i> .....	61
	4.4.2 Efisiensi Tinggi Media dengan <i>Single Venturi Vacuum</i> .....	63
	4.4.3 Efisiensi Tinggi Media dengan <i>Double Venturi Vacuum</i> .....	64
4.5	Analisis Statistik Variabel dengan <i>One-way Anova</i> .....	67
	4.5.1 Analisis Efisiensi dengan Jumlah <i>Venturi</i> .....	67
	4.5.2 Analisis Efisiensi dengan Ukuran Media .....	68
	4.5.3 Analisis Efisiensi dengan Tinggi Media.....	69

4.6 Efisiensi Reaktor <i>Wet Scrubber</i> pada Proses Penurunan Emisi .....	71
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1 Kesimpulan.....	75
5.2 Saran .....	75
DAFTAR PUSTAKA	

**"Halaman ini sengaja dikosongkan"**

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 <i>Concept of mass transfer model based on two-films theory</i> .....	14
Gambar 2.2 Grafik Hubungan antara Kelarutan dan Temperatur .....	15
Gambar 2.3 Diagram Aliran <i>Co-Current</i> .....	17
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian .....	27
Gambar 3.2 Desain <i>Wet Scrubber</i> .....	30
Gambar 4.1 Nilai Emisi NO <i>No Venturi Vacuum</i> .....	41
Gambar 4.2 Nilai Emisi CO <i>No Venturi Vacuum</i> .....	41
Gambar 4.3 Nilai Emisi SO <sub>2</sub> <i>No Venturi Vacuum</i> .....	42
Gambar 4.4 Nilai Emisi NO <i>Single Venturi Vacuum</i> .....	44
Gambar 4.5 Nilai Emisi CO <i>Single Venturi Vacuum</i> .....	44
Gambar 4.6 Nilai Emisi SO <sub>2</sub> <i>Single Venturi Vacuum</i> .....	45
Gambar 4.7 Nilai Emisi NO <i>Double Venturi Vacuum</i> .....	46
Gambar 4.8 Nilai Emisi CO <i>Double Venturi Vacuum</i> .....	47
Gambar 4.9 Nilai Emisi SO <sub>2</sub> <i>Double Venturi Vacuum</i> .....	48
Gambar 4.10 Efisiensi Variabel Tinggi Media 5 cm <i>No Venturi Vacuum</i> .....	49
Gambar 4.11 Efisiensi Variabel Tinggi Media 5 cm <i>Single Venturi Vacuum</i> .....	50
Gambar 4.12 Efisiensi Variabel Tinggi Media 5 cm <i>Double Venturi Vacuum</i> ....	50
Gambar 4.13 Efisiensi Variabel Tinggi Media 10 cm <i>No Venturi Vacuum</i> .....	51
Gambar 4.14 Efisiensi Variabel Tinggi Media 10 cm <i>Single Venturi Vacuum</i> ....	51
Gambar 4.15 Efisiensi Variabel Tinggi Media 10 cm <i>Double Venturi Vacuum</i> ..	52
Gambar 4.16 Efisiensi Variabel Tinggi Media 15 cm <i>No Venturi Vacuum</i> .....	53
Gambar 4.17 Efisiensi Variabel Tinggi Media 15 cm <i>Single Venturi Vacuum</i> ....	53
Gambar 4.18 Efisiensi Variabel Tinggi Media 15 cm <i>Double Venturi Vacuum</i> ..	53
Gambar 4.19 Efisiensi NO Variabel Ukuran Media <i>No Venturi Vacuum</i> .....	56
Gambar 4.20 Efisiensi CO Variabel Ukuran Media <i>No Venturi Vacuum</i> .....	56
Gambar 4.21 Efisiensi SO <sub>2</sub> Variabel Ukuran Media <i>No Venturi Vacuum</i> .....	56
Gambar 4.22 Efisiensi NO Variabel Ukuran Media <i>Single Venturi Vacuum</i> .....	57
Gambar 4.23 Efisiensi CO Variabel Ukuran Media <i>Single Venturi Vacuum</i> .....	58
Gambar 4.24 Efisiensi SO <sub>2</sub> Variabel Ukuran Media <i>Single Venturi Vacuum</i> .....	58

Gambar 4.25 Efisiensi NO Variabel Ukuran Media <i>Double Venturi Vacuum</i> .....	59
Gambar 4.26 Efisiensi CO Variabel Ukuran Media <i>Double Venturi Vacuum</i> .....	59
Gambar 4.27 Efisiensi SO <sub>2</sub> Variabel Ukuran Media <i>Double Venturi Vacuum</i> .....	60
Gambar 4.28 Efisiensi NO Variabel Tinggi Media <i>No Venturi Vacuum</i> .....	62
Gambar 4.29 Efisiensi CO Variabel Tinggi Media <i>No Venturi Vacuum</i> .....	62
Gambar 4.30 Efisiensi SO <sub>2</sub> Variabel Tinggi Media <i>No Venturi Vacuum</i> .....	62
Gambar 4.31 Efisiensi NO Variabel Tinggi Media <i>Single Venturi Vacuum</i> .....	63
Gambar 4.32 Efisiensi CO Variabel Tinggi Media <i>Single Venturi Vacuum</i> .....	64
Gambar 4.33 Efisiensi SO <sub>2</sub> Variabel Tinggi Media <i>Single Venturi Vacuum</i> .....	64
Gambar 4.34 Efisiensi NO Variabel tinggi Media <i>Double Venturi Vacuum</i> .....	65
Gambar 4.35 Efisiensi CO Variabel Tinggi Media <i>Double Venturi Vacuum</i> .....	65
Gambar 4.36 Efisiensi SO <sub>2</sub> Variabel Tinggi Media <i>Double Venturi Vacuum</i> .....	66



## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Analisis Ultimate Plastik .....	7
Tabel 2.2 Jenis-jenis Hidrokarbon (HC) Aromatik dan Pengaruhnya terhadap Kesehatan Manusia.....	10
Tabel 2.3 Kelarutan Gas dalam Air .....	16
Tabel 2.4 Baku Mutu Emisi Pengolahan Sampah secara Termal .....	22
Tabel 2.5 Penelitian Terdahulu .....	23
Tabel 3.1 Variasi Percobaan Penelitian .....	35
Tabel 4.1 Uji Statistik Hubungan Jumlah <i>Venturi</i> terhadap Efisiensi NO.....	67
Tabel 4.2 Uji Statistik Hubungan Jumlah <i>Venturi</i> terhadap Efisiensi CO.....	68
Tabel 4.3 Uji Statistik Hubungan Jumlah <i>Venturi</i> terhadap Efisiensi SO <sub>2</sub> .....	68
Tabel 4.4 Uji Statistik Hubungan Ukuran Media terhadap Efisiensi NO .....	68
Tabel 4.5 Uji Statistik Hubungan Ukuran Media terhadap Efisiensi CO .....	69
Tabel 4.6 Uji Statistik Hubungan Ukuran Media terhadap Efisiensi SO <sub>2</sub> .....	69
Tabel 4.7 Uji Statistik Hubungan Tinggi Media terhadap Efisiensi NO .....	70
Tabel 4.8 Uji Statistik Hubungan Tinggi Media terhadap Efisiensi CO.....	70
Tabel 4.9 Uji Statistik Hubungan Tinggi Media terhadap Efisiensi SO <sub>2</sub> .....	70
Tabel 4.10 Hasil Uji Statistik <i>One-way Anova</i> terhadap Efisiensi.....	71
Tabel 4.11 Perbandingan Nilai <i>Outlet</i> dengan Baku Mutu .....	72

**“Halaman ini sengaja dikosongkan”**

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Sampah merupakan masalah serius yang sedang dihadapi oleh berbagai negara di dunia, termasuk di Indonesia. Tingginya laju pertumbuhan penduduk mengakibatkan semakin banyaknya masyarakat yang menghasilkan sampah dari kebutuhan hidup setiap harinya. Sehingga diperlukan suatu teknologi yang mampu mengurangi volume timbulan sampah yang dihasilkan. Berbagai macam upaya telah dilakukan untuk mengurangi sampah, salah satunya dengan cara dibakar atau insinerasi. Insinerasi merupakan suatu proses pengolahan sampah dengan cara pembakaran pada temperatur tinggi untuk mereduksi sampah. Salah satu alat pembakar sampah modern yang biasa digunakan yaitu *incinerator*.

Penanganan sampah plastik *non-reusable* dapat diterapkan dengan menggunakan sistem pembakaran *incinerator* karena lebih efisien (Eriksson, 2009). *Incinerator* adalah alat yang digunakan untuk proses pembakaran sampah yang berfungsi untuk merubah bentuk sampah menjadi lebih kecil dan praktis serta dapat menghasilkan sisa pembakaran yang dapat digunakan sebagai energi alternative bagi proses lain seperti pemanasan atau pengeringan (Patrick dalam Budiman, 2001). Dalam pengoperasiannya *incinerator* menghasilkan gas buang yang dikeluarkan ke udara. Gas buang hasil sisa pembakaran mengandung zat-zat berbahaya yang berdampak terhadap kesehatan manusia dan lingkungan. Sehingga perlu dilakukan rekayasa teknologi untuk mereduksi kandungan emisi yang dikeluarkan *incinerator* sebelum dilepaskan ke udara bebas.

Permasalahan yang sering terjadi pada pembakaran menggunakan *incinerator* secara umum adalah emisi gas buang seperti nitrogen oksida (NO<sub>x</sub>), sulfur oksida (SO<sub>x</sub>), karbon monoksida (CO), partikulat, logam, gas-gas bersifat asam, dioksin dan furan yang dapat mencemari lingkungan (Trihadiningrum, 2016). Terbentuknya emisi udara tersebut dipengaruhi oleh jenis komponen sampah yang dibakar, proses pembakaran yang tidak

sempurna dan sistem pembakaran yang digunakan (Subagiyo dkk, 2015). Sehingga, perlu adanya alat pelengkap untuk mengendalikan emisi hasil insinerasi ini sebelum dibuang ke lingkungan. Salah satu alat yang dapat digunakan untuk mengendalikan emisi insinerator adalah *wet scrubber*.

*Wet scrubber* merupakan teknologi absorpsi untuk mereduksi partikulat dan gas asam pada titik sumber pencemar (EPA, 1995). Umumnya tipe *wet scrubber* yang sering digunakan adalah *countercurrent packed column tower* karena memiliki efisiensi penyisihan polutan yang lebih tinggi daripada tipe lain (EPA, 1995). Prinsip kerja dari *wet scrubber* menggunakan sistem *liquid* untuk membuang polutannya. Pada *wet scrubber* arus gas kotor dialirkan menuju media filter dengan *liquid absorber* dengan cara menyemprotkan dan kemudian mengalirkannya ke media filter. Menurut Rizal (2017) untuk dapat menghasilkan pembakaran yang sesuai dengan baku mutu udara *incinerator* seperti dalam peraturan Kep-03/Bapedal/09/1995 dapat menggunakan *wet scrubber (air pollution control)* untuk menangkap gas-gas yang bersifat asam sehingga menghasilkan gas buang emisi yang lebih aman dan tidak membahayakan lingkungan.

Dalam peningkatan efisiensi dari *wet scrubber* digunakan variasi alat dengan sistem *venturi vacuum*. Prinsip *venturi vacuum* yaitu dengan aliran fluida cair yang digerakkan oleh pompa sentrifugal melewati saluran *venturi*. Besar tekanan yang dihasilkan oleh *venturi* dipengaruhi oleh penambahan kecepatan aliran akibat dari pengecilan penampang saluran yang mengikuti prinsip Bernoulli. Kinerja penyerapan larutan absorben terhadap gas kontaminan di dalam sistem *packed tower scrubber* dipengaruhi oleh diameter media dan tinggi media *packing* (Suryaningtyas, 2006).

Terraglio, dkk (2012) menurunkan polutan SO<sub>2</sub> dengan menggunakan absorben air, secara keseluruhan, SO<sub>2</sub> mampu terlarut dalam air hingga mencapai efisiensi penurunan yang tinggi yaitu 98,5%. Didukung oleh penelitian Zhang (2011) yang menyatakan bahwa pengurangan jumlah besar SO<sub>2</sub> menunjukkan bahwa mayoritas SO<sub>2</sub> (sekitar 70-80%) telah dikonversi dari fase gas ke fase cair, menunjukkan kelarutan SO<sub>2</sub> yang tinggi. Penurunan polutan SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> dengan menggunakan teknologi *packed tower scrubber*

mampu menurunkan emisi secara stabil (Pillai, 2009). Bartocci (2011) juga menyatakan bahwa *two stage scrubber* dapat menyisihkan polutan gas lebih besar dari pada *single stage scrubber*, penyisihannya bisa mencapai 99%.

Meninjau dari penelitian yang telah ada, maka dalam penelitian ini akan diteliti efisiensi dari alat *wet scrubber* untuk menurunkan polutan dari emisi gas buang pembakaran *incinerator* dengan menggunakan absorben air dan memvariasikan ukuran dan tinggi media filter. Penelitian yang dilakukan difokuskan pada reaktor *three-stage filter wet scrubber* dalam menangkap emisi gas buang *incinerator* dari pembakaran plastik *non-reusable*.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimanakah pengaruh variasi jumlah *venturi* terhadap efisiensi penurunan emisi dari pembakaran sampah *non-reusable*?
2. Bagaimanakah pengaruh variasi ukuran media filter terhadap efisiensi penurunan emisi dari pembakaran sampah *non-reusable*?
3. Bagaimanakah pengaruh variasi tinggi media filter terhadap efisiensi penurunan emisi dari pembakaran sampah *non-reusable*?

## **1.3 Tujuan Penelitian**

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menetapkan pengaruh variasi jumlah *venturi* terhadap efisiensi penurunan emisi dari pembakaran sampah *non-reusable*.
2. Menetapkan pengaruh variasi ukuran media filter terhadap efisiensi penurunan emisi dari pembakaran sampah *non-reusable*.
3. Menetapkan pengaruh variasi tinggi media filter terhadap efisiensi penurunan emisi dari pembakaran sampah *non-reusable*.

## **1.4 Manfaat Penelitian**

Manfaat yang diharapkan dapat diperoleh dari penelitian ini adalah:

1. Penelitian ini dapat digunakan sebagai salah satu teknologi yang dapat diaplikasikan untuk mengolah emisi hasil dari pembakaran *incinerator*.

2. Penelitian ini dapat memberikan alternatif dalam pengendalian emisi hasil pembakaran *incinerator* yang efektif dan efisien.
3. Dapat dijadikan pertimbangan dalam pengembangan teknologi penurunan emisi gas dengan *venturi vacuum* pada sistem *three-stage filter wet scrubber* selanjutnya.

### **1.5 Ruang Lingkup**

Ruang lingkup dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini dilakukan dalam skala laboratorium di Laboratorium Pengendalian Pencemaran Udara dan Perubahan Iklim Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
2. Sampel yang digunakan adalah emisi gas *incinerator* sampah plastik *non-reusable*. Jenis plastik *non-reusable* yang dibakar *incinerator* yaitu PP (*polypropylene*).
3. Absorben yang digunakan adalah air Perusahaan Daerah Air Minum (PDAM) di Teknik Lingkungan ITS Surabaya.
4. Variabel yang akan diteliti adalah pengaruh jumlah *venturi vacuum*, ukuran media filter, dan tinggi media filter.
5. Parameter yang akan diteliti adalah kadar NO, CO dan SO<sub>2</sub> pada *inlet* dan *outlet* reaktor *wet scrubber*.
6. Penelitian ini tidak melakukan pengujian kandungan air.

## **BAB 2**

### **KAJIAN PUSTAKA**

#### **2.1 *Incinerator***

Sampah adalah limbah atau buangan yang bersifat padat, setengah padat yang merupakan hasil sampingan dari kegiatan perkotaan atau siklus kehidupan manusia, hewan maupun tumbuhan (Kodoatie, 2003). Salah satu teknik pengolahan sampah yaitu dengan membakar atau biasa disebut dengan insinerasi dengan unit pembakar sampah yang disebut *incinerator*. Insinerasi adalah proses pembakaran limbah padat yang dikendalikan langsung oleh oksigen pada suhu sekitar 800° C atau lebih. *Incinerator* adalah alat yang digunakan untuk proses pembakaran sampah yang berfungsi untuk merubah bentuk sampah menjadi lebih kecil dan praktis serta dapat menghasilkan sisa pembakaran yang dapat digunakan sebagai energi alternative bagi proses lain seperti pemanasan atau pengeringan (Patrick dalam Budiman, 2001).

*Incinerator* merupakan tungku pembakaran dengan suhu tinggi untuk mengolah limbah padat dan mengkonversi materi padat menjadi materi gas (*bottom ash*) dan abu (*fly ash*). Panas yang dihasilkan dari proses *incinerator* dapat dimanfaatkan sebagai energi pembangkit listrik. Sehingga pengolahan ini banyak digunakan untuk mengurangi volume timbulan sampah perkotaan yang semakin hari semakin meningkat.

##### **2.1.1 Sampah Plastik**

Sebagian besar komposisi sampah padat berjenis plastik yang susah diolah dan didaur ulang. Plastik merupakan material yang terbentuk dari proses polimerasi karbon dan hidrogen yaitu proses penggabungan beberapa molekul sederhana menjadi molekul kompleks. Plastik terbagi menjadi 2 (dua) jenis yaitu *thermoplast* dan *thermoset*. *Thermoplast* merupakan plastik yang apabila dipanaskan hingga suhu tertentu akan mencair dan dapat dibentuk kembali sesuai kebutuhan. Sedangkan *thermoset* adalah plastik yang apabila dipanaskan tidak dapat mencair dan dibentuk kembali (Bajus dan Hajekova dalam Surono, 2013).

Jenis-jenis plastik menurut Koswara (2006) antara lain:

1. PETE atau PET (*Polyethylene Terephthalate*)

PETE atau PET biasa dipakai untuk botol plastik yang transparan seperti botol air mineral dan botol minuman lainnya. Botol atau produk dari bahan plastik ini hanya bisa digunakan sekali pakai saja dan tidak untuk air hangat apalagi panas, karena apabila dipakai berulang kali kandungan partikel berbahaya yang ada di bahan ini akan lepas dan dapat mengeluarkan zat karsinogenik.

2. HDPE (*High Density Polyethylene*)

HDPE merupakan salah satu bahan plastik yang aman untuk digunakan karena kemampuan mencegah reaksi kimia antara kemasan plastik berbahan HDPE dengan makanan/minuman yang dikemasnya. Plastik jenis HDPE mempunyai sifat bahan yang kuat, keras, dan mempunyai ketahanan pada suhu tinggi. Bahan jenis ini biasanya digunakan untuk botol susu yang berwarna putih bening, *tupperware*, galon air mineral, dan sebagainya.

3. PVC (*Polyvinyl Chloride*)

Plastik jenis PVC merupakan jenis plastik yang sulit didaur ulang dan biasanya tidak digunakan untuk pembungkus botol. PVC mengandung DEHA yang dapat bereaksi dengan makanan yang dikemas dan apabila bersentuhan langsung dengan makanan tersebut dapat berpotensi menyebabkan penyakit ginjal dan hati.

4. LDPE (*Low Density Polyethylene*)

Plastik jenis LDPE memiliki sifat mekanis kuat, fleksibel, kedap air tetapi tembus cahaya. Plastik berbahan LDPE baik sebagai tempat pembungkus makanan karena sulit bereaksi secara kimiawi dengan makanan yang dibungkus.

5. PP (*Polypropylene*)

Plastik berjenis PP mempunyai karakteristik transparan berwarna putih tetapi tidak jernih, mengkilap, dan akan melunak pada suhu 1500° C. Plastik berbahan PP lebih kuat dengan daya tembus uap yang rendah serta stabil terhadap suhu yang tinggi. Plastik jenis ini



baik digunakan sebagai tempat penyimpanan makanan, minuman, obat, dan botol minum bayi.

6. PS (*Polystyrene*)

Plastik jenis PS biasanya dijumpai dalam bentuk *styrofoam*. *Styrofoam* sebaiknya tidak digunakan untuk menyimpan makanan berlemak/berminyak dalam keadaan panas. Plastik berbahan jenis ini harus dihindari karena selain berbahaya untuk kesehatan otak juga dapat mengganggu hormon esterogen pada wanita.

7. OTHER (*SAN/Styrene Acrylonitrile, ABS/Acrylonitrile Butadiene Styrene, PC/Polycarbonate, Nylon*)

Plastik jenis SAN dan ABS memiliki resistensi yang tinggi terhadap reaksi kimia, suhu, kekuatan, kekakuan, dan tingkat kekerasan yang telah ditingkatkan sehingga plastik jenis ini cukup baik untuk digunakan. Banyak ditemukan pada tempat makanan dan minuman seperti botol minum olahraga, alat-alat rumah tangga, peralatan makan bayi dan plastik kemasan. Plastik jenis PC ini dapat mengeluarkan bahan utamanya yaitu *Bisphenol-A* ke dalam makanan minuman yang dikemasnya yang berpotensi merusak sistem hormon, kromosom pada ovarium, penurunan produksi sperma, dan mengubah fungsi imunitas. Dianjurkan untuk tidak dipergunakan untuk tempat makanan atau minuman karena *Bisphenol-A* dapat berpindah ke dalam makanan atau minuman jika suhunya dinaikkan karena adanya pemanasan. Analisis *ultimate* plastik dapat dilihat pada Tabel 2.1.

**Tabel 2.1 Analisis *ultimate* Plastik**

Jenis plastik	Ultimate Analysis (% Berat)				
	C	H	N	S	O
PET	63,94	4,52	0,01	0,04	31,49
HDPE	86,99	12,12	0,27	0,07	0,56
PVC	37,24	4,99	0,08	0,08	0
LDPE	85,6	13,4	0,26	0	0,74
PP	86,88	12,5	0,28	0,03	0,32
SS	91,57	7,8	0,15	0,04	0,45

Sumber: Anuar Sharuddin et al, 2017

### 2.1.2 Proses Pembakaran

Pembakaran adalah suatu reaksi kimia antara bahan bakar dan pengoksidasi (udara atau oksigen) yang menghasilkan panas. Proses pembakaran ini dapat berlangsung jika ada bahan bakar, pengoksidasi (udara atau oksigen) dan panas atau energi aktivasi (Wardana, 2008). Menurut Loo dan Koppejan (2008) proses pembakaran biomassa melibatkan sejumlah aspek fisik dan kimia yang kompleks. Secara umum proses pembakaran tergantung pada propertis dari bahan bakar dan aplikasi pembakaran.

Proses pembakaran ditinjau dari jumlah pengoksidasi (udara atau oksigen) dapat dibedakan menjadi pembakaran lengkap (*complete combustion*) dan pembakaran tidak lengkap (*incomplete combustion*). Proses pembakaran lengkap terjadi bila bahan bakar bereaksi dengan elemen pengoksidasi seperti udara atau oksigen dan menghasilkan senyawa yang disusun dari elemen-elemen bahan bakar dengan elemen pengoksidasi. Sedangkan proses pembakaran tidak lengkap terjadi bila udara atau oksigen yang dibutuhkan tidak cukup untuk membakar bahan bakar secara lengkap untuk menghasilkan karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) dan air. Pada pembakaran tidak lengkap karbon dalam bahan bakar akan diubah menjadi gas karbon monoksida sedangkan nitrogen yang ada dalam udara pada temperatur tinggi akan diubah menjadi NO<sub>x</sub>.

Menurut Culp dalam Budiman (2001) pencampuran udara dan bahan bakar yang baik dalam pembakaran aktual biasanya tidak dapat dicapai tetapi didekati melalui penambahan *excess* udara. Penambahan *excess* udara harus baik dengan nilai minimum karena apabila terlalu banyak dapat meningkatkan kehilangan energi dalam pembakaran dan meningkatkan emisi NO<sub>x</sub>.

### 2.1.3 Komponen Emisi *Incinerator*

Kualitas udara pada area pembakaran *incinerator* pasti cenderung menurun dan mengalami pencemaran akibat dari gas-gas yang dihasilkan oleh proses insinerasi. Beberapa komponen yang sering

ditemui antara lain karbon monoksida (CO), nitrogen oksida (NO<sub>x</sub>), belerang oksida (SO<sub>x</sub>), hidrokarbon (HC), dan partikel.

#### 1. Karbon Monoksida (CO)

Karbon monoksida atau CO adalah suatu gas yang tidak berwarna, tidak berbau dan juga tidak berasa. Gas CO dapat terbentuk selama pembakaran apabila tidak tersedia cukup oksigen. Karbon monoksida apabila terhisap ke dalam paru-paru akan ikut mengalir ke dalam peredaran darah dan akan menghalangi masuknya oksigen (O<sub>2</sub>) yang dibutuhkan oleh tubuh. Hal ini dapat terjadi karena gas CO bersifat racun yang dapat ikut bereaksi secara metabolisme dengan darah. Keracunan CO menyebabkan kepala pusing, muntah-muntah, dan kematian.

#### 2. Nitrogen Oksida (NO<sub>x</sub>)

Sumber NO<sub>x</sub> dapat berasal dari reaksi antara nitrogen dan oksigen dalam udara panas selama pembakaran. Nitrogen Oksida sering disebut dengan NO<sub>x</sub> karena oksida nitrogen mempunyai 2 bentuk yang sifatnya berbeda, yakni gas NO<sub>2</sub> dan gas NO. Sifat gas NO<sub>2</sub> adalah berwarna dan berbau, sedangkan gas NO tidak berwarna dan tidak berbau. Warna gas NO<sub>2</sub> adalah merah kecoklatan dan berbau tajam menyengat. Konsentrasi gas NO yang tinggi dapat menyebabkan gangguan pada sistem saraf yang mengakibatkan kejang-kejang. Apabila keracunan ini terus berlanjut maka akan dapat menyebabkan kelumpuhan.

#### 3. Sulfur Oksida (SO<sub>x</sub>)

Gas SO<sub>x</sub> dapat terbentuk apabila bahan bakar yang digunakan pembakaran mengandung belerang. Gas belerang oksida atau sering disebut dengan SO<sub>x</sub> terdiri dari gas SO<sub>2</sub> dan gas SO<sub>3</sub> yang keduanya mempunyai sifat berbeda. Gas SO<sub>2</sub> berbau tajam dan tidak mudah terbakar, sedangkan gas SO<sub>3</sub> bersifat sangat reaktif. Udara yang telah tercemar SO<sub>x</sub> menyebabkan manusia akan mengalami gangguan pada sistem pernapasaannya. Hal ini karena gas SO<sub>x</sub> yang mudah menjadi asam tersebut dapat menyerang selaput lendir pada hidung,

tenggorokan dan saluran pernafasan lainnya sampai ke paru-paru. Serangan gas SO<sub>x</sub> tersebut dapat menyebabkan iritasi pada bagian tubuh yang terkena.

#### 4. Hidrokarbon (HC)

Emisi HC akan terbentuk jika proses pembakaran terganggu seperti suhu pembakaran kurang tinggi dan rasio F/A tidak tepat (Mugo, 2017). Hidrokarbon atau biasa disebut dengan HC terdiri dari elemen hidrogen (H) dan karbon (C). Hingga saat ini belum ada bukti yang menunjukkan bahwa HC pada konsentrasi udara ambien memberikan pengaruh langsung yang merugikan manusia. Berdasarkan penelitian yang dilakukan terhadap hewan dan manusia diketahui bahwa hidrokarbon alifatik dan alisiklis memberikan pengaruh yang tidak diinginkan kepada manusia hanya pada konsentrasi beberapa ratus sampai beberapa ribu kali lebih tinggi daripada konsentrasi yang terdapat di atmosfer (Fardiaz, 1992).

Adapun pengaruh hidrokarbon terhadap kesehatan manusia dapat dilihat pada Tabel 2.2.

**Tabel 2.2 Jenis-Jenis Hidrokarbon (HC) Aromatik dan Pengaruhnya terhadap Kesehatan Manusia**

Jenis Hidrokarbon	Konsentrasi (ppm)	Dampak Kesehatan
Benzene (C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> )	100	Iritasi membran mukosa
	3.000	Lemas setelah 1/2 - 1 jam
	7.500	Pengaruh sangat berbahaya setelah pemaparan 1 jam
	20.000	Kematian setelah pemaparan 5 - 10 menit
Toulena (C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> )	200	Pusing, lemah, dan berkunang-kunang setelah pemaparan 8 jam
	600	Kehilangan koordinasi dan bola mata terbalik setelah pemaparan 8 jam

Sumber: Ebenezer, 2006

#### 5. Partikel

Partikel dapat terbentuk dalam proses hasil insinerasi melalui pembakaran yang tidak sempurna dan pelepasan bagian limbah yang tidak terbakar. Partikel yang berdiameter kurang dari 10 µm atau

biasa disebut dengan PM<sub>10</sub> (*particulate matter*) membahayakan kesehatan karena dapat terhisap ke dalam paru-paru. PM<sub>10</sub> diyakini oleh para pakar lingkungan dan kesehatan masyarakat PM<sub>10</sub> sebagai pemicu timbulnya infeksi dalam saluran pernafasan, karena partikel padat PM<sub>10</sub> dapat mengendap pada saluran pernafasan daerah bronki dan alveoli. PM<sub>10</sub> sangat membahayakan karena memiliki kemampuan untuk menembus ke dalam paru-paru. Sedangkan rambut di dalam hidung hanya dapat menyaring debu yang berukuran lebih besar dari 10 µm (Agus dkk, 2007).

## 2.2 Penurunan Emisi

Kualitas udara di sekitar *incinerator* pasti akan menurun dan apabila hal itu dibiarkan terus menerus dapat menyebabkan pencemaran udara dan lingkungan. Hal ini disebabkan oleh adanya proses pembakaran yang akan menghasilkan gas karbondioksida (CO<sub>2</sub>) yang membahayakan lingkungan. Kandungan berlebih gas CO<sub>2</sub> dalam udara akan menyebabkan efek *green house*. Efek *green house* ini akan meningkatkan suhu di atmosfer sehingga menimbulkan efek pemanasan global. Oleh karena itu diperlukan suatu metode untuk menurunkan emisi hasil keluaran dari proses insinerasi tersebut sebelum dikeluarkan ke udara bebas. Salah satu metode yang dapat digunakan yaitu dengan metode absorpsi.

### 2.2.1 Absorpsi

Absorpsi adalah perpindahan massa dari fase gas ke fase cair dimana gas tersebut dapat larut dalam fase cairnya. Absorpsi akan terjadi jika campuran gas dikontakkan dengan suatu *liquid* penyerap yang sesuai, sehingga satu atau lebih komponen dalam campuran gas dapat terlarut dalam *liquid* penyerap tersebut. Absorpsi dapat berlangsung dalam dua macam proses, yaitu absorpsi fisik dan absorpsi kimia. Absorpsi fisik merupakan absorpsi dimana gas terlarut dalam *liquid* penyerap tanpa disertai dengan reaksi kimia (Treybal, 1980).

Penelitian Aboudheir (1998) memberikan gambaran tentang proses absorpsi CO<sub>2</sub> dalam larutan MEA (*mono ethanol amina*) yang sangat pekat (3 – 9 km/m<sup>3</sup>). Penelitian dilakukan untuk melihat efek

dari *range* kondisi operasi yang lebar terhadap efisiensi removal untuk proses absorpsi ini. Kondisi operasi yang digunakan meliputi konsentrasi solvent yang sangat tinggi, tipe *media packing*, laju alir gas dan liquid, komposisi gas masuk, dan loading larutan CO<sub>2</sub>. Hasil yang diperoleh menyatakan bahwa kapasitas absorpsi larutan amina akan meningkat seiring dengan peningkatan konsentrasinya. Selain itu dapat disimpulkan bahwa seiring dengan peningkatan laju air liquid, maka efisiensi penghilangan dari CO<sub>2</sub> juga akan meningkat. Kenaikan kapasitas absorpsi dapat dilihat dari kenaikan harga koefisien perpindahan massa serta luas interfacialnya.

Penerapan absorpsi bertujuan untuk menghilangkan suatu komponen dari campuran gas atau untuk menghasilkan suatu produk reaksi. Keuntungan absorpsi dengan reaksi kimia adalah memperbesar harga koefisien transfer massa. Transfer massa akan terus berlangsung sampai *liquid* mencapai titik jenuh. Pada saat mengalami kejenuhan, kesetimbangan antara laju transfer massa kontaminan ke *liquid* dan laju transfer massa bagian yang terlarut pada fase gas akan terjadi.

Proses absorpsi terbagi menjadi dua macam yaitu absorpsi fisik dan absorpsi kimia. Absorpsi fisik merupakan absorpsi dimana gas terlarut dalam cairan penyerap yang tidak disertai dengan reaksi kimia. Penyerapan terjadi karena adanya interaksi fisik. Contoh dari reaksi ini adalah absorpsi gas H<sub>2</sub>S dengan air, methanol, propilen carbonate. Sedangkan absorpsi kimia merupakan absorpsi dimana gas terlarut dalam larutan penyerap disertai dengan adanya reaksi kimia. Contoh dari absorpsi ini adalah absorpsi gas CO<sub>2</sub> dengan larutan MEA, NaOH, K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, dan sebagainya. Absorpsi kimia ditandai dengan pertukaran electron antara absorbat dengan absorben (Brown, 1950).

### **2.2.2 Transfer Massa**

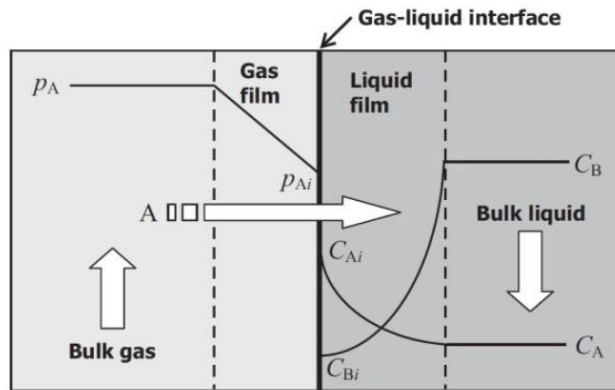
Transfer massa adalah perpindahan massa antara fase gas ke fase cair terjadi karena adanya beda konsentrasi antar kedua fase. Transfer massa atau perpindahan massa disebut sebagai perpindahan suatu komponen dari satu lokasi ke lokasi lain dikarenakan adanya

ketidakseimbangan konsentrasi (Azhar dan Herti, 2017). Pada penelitian Merchuk dan Ben-Zvi (1992) tentang perpindahan massa pada fluida *non-newtonian* larutan CMC (*carboxymethyl cellulose*) dan xanthan menggunakan reaktor tangki berpengaduk. Hasil penelitian menunjukkan bahwa bertambahnya laju alir udara akan menaikkan koefisien transfer massa.

Transfer massa atau perpindahan massa juga dapat didefinisikan sebagai gerakan molekul-molekul dari elemen fluida yang disebabkan adanya suatu gaya pendorong (*driving force*) yaitu adanya perbedaan (gradien) konsentrasi. Difusi adalah peristiwa di mana terjadi transfer materi melalui materi lain. Transfer materi ini berlangsung karena partikel bergerak oleh agitasi *thermal*. Pada fase gas-cair peristiwa difusi mudah terjadi dan pada fase padat difusi juga dapat terjadi walaupun memerlukan waktu yang lebih lama (Haryanto, 2008).

Untuk menghitung kecepatan transfer massa, salah satu teori yang bisa dipakai adalah teori dua lapis film yang dikembangkan oleh Whitman dan Lewis (Treybal, 1980). Teori ini didasarkan pada bidang sentuh antara gas dan air. Keberadaan film ini akan memberikan hambatan pada perpindahan massa dari fase satu ke fase yang lain. Teori dua lapis film menyatakan bahwa kecepatan transfer massa sebanding dengan perbedaan antara konsentrasi yang ada dengan konsentrasi jenuh dari gas pada larutan tersebut.

Mekanisme perpindahan massa menurut Hukum Fick I menunjukkan bahwa perpindahan massa terjadi karena adanya gradient konsentrasi massa. Hukum Fick I mendefinisikan “laju difusi berbanding lurus dengan gradien konsentrasinya”. Kondisi dari hukum ini adalah tanpa adanya perubahan konsentrasi akibat pengaruh waktu difusi, sehingga pemakaiannya terbatas pada difusi *steady state* (dengan konsentrasi yang dianggap sama pada setiap posisi. Konsep transfer massa dapat dilihat pada Gambar 2.1.



**Gambar 2.1** *Concept of Mass Transfer Model Based on The Two-films Theory*

(Sumber: Hillestad et al, 2012)

Persamaan Hukum Fick I:

$$\frac{dc}{dt} = K_L (C_s - C) \quad (2.1)$$

dimana:

$K_L$  = koefisien transfer dalam fase cair ( $\text{jam}^{-1}$ )

$C_s$  = konsentrasi gas jenuh ( $\text{mg/l}$ )

$C$  = konsentrasi gas di cairan ( $\text{mg/l}$ )

### 2.2.3 Kelarutan Gas

Terdapat dua prinsip utama berkaitan dengan kelarutan gas dalam cairan. Pertama, makin tinggi titik cair suatu gas maka gaya tarik antar molekul akan makin mendekati sifat cairan. Dengan demikian gas dengan titik cair lebih tinggi memiliki kelarutan lebih besar. Kedua, pelarut yang paling baik untuk suatu gas adalah pelarut yang mempunyai gaya tarik antar molekul mirip dengan yang dimiliki oleh gas (Khoerunnisa, 2008).

Kelarutan gas umumnya akan berkurang pada temperatur yang lebih tinggi. Kelarutan gas akan naik jika tekanan gas yang terletak di atas larutan dinaikkan. Menurut Hukum Henry, massa gas yang melarut dalam jumlah tertentu cairan (pelarutnya) berbanding lurus dengan tekanan yang dilakukan oleh gas tersebut yang berada dalam kesetimbangan dengan larutan itu.



Persamaan Hukum Henry:

$$S_{\text{gas}} = k_{\text{H}} \times P_{\text{gas}} \quad (2.2)$$

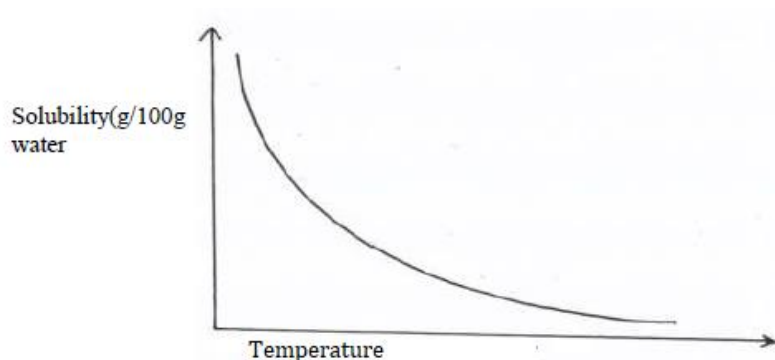
dimana:

$S_{\text{gas}}$  = kelarutan gas (mol/L)

$k_{\text{H}}$  = konstanta Henry (mol/L.atm)

$P_{\text{gas}}$  = tekanan parsial gas (atm)

Banyak faktor yang dapat mempengaruhi kelarutan gas salah satunya yaitu temperatur. Secara umum kelarutan gas dalam air akan menurun dengan kenaikan temperatur. Air yang lebih dingin dapat memiliki lebih banyak gas terlarut di dalamnya seperti ditunjukkan pada Gambar 2.2.



**Gambar 2.2 Grafik Hubungan antara Kelarutan dan Temperatur**

(Sumber: Zumdahl, 2010)

Menurut Terraglio (2012) dan Al-Hussari (2015) gas  $\text{SO}_2$  mudah larut dalam air karena memiliki kelarutan yang tinggi terhadap air. Selain terlarut dalam air, gas  $\text{SO}_2$  juga dapat terserap oleh embun yang terbentuk di reaktor. Hal tersebut juga dibuktikan pada penelitian Zhang (2011) yang menurunkan kandungan  $\text{SO}_2$  di Cina pada kondisi tidak berembun dan berembun. Penurunan gas  $\text{SO}_2$  memperlihatkan hasil bahwa gas  $\text{SO}_2$  pada kondisi tidak berembun dapat menurun hingga 25 ppbv, sedangkan pada kondisi berembun gas  $\text{SO}_2$  dapat menurun hingga 6,8 ppbv.

Gas CO memiliki nilai efisiensi terendah karena gas CO tidak dapat larut dalam air yang digunakan sebagai absorben. Menurut Jáuregui-Haza (2004) dalam penelitiannya yang membandingkan tingkat kelarutan gas H dan CO dalam air menunjukkan bahwa gas CO dapat

larut dalam air dan kelarutannya lebih tinggi daripada gas H. namun kelarutan gas CO dalam air masih sangat kecil yaitu  $128,79 \pm 2,01$  MPa m<sup>3</sup>/kmol pada suhu 353 K. Kaye dan Laby (1986) melakukan pengujian kelarutan berbagai gas dalam air pada tekanan 1 atm pada suhu 20°C. Dari berbagai gas tersebut, terdapat gas CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> dan SO<sub>2</sub> yang hasilnya dapat dilihat ada Tabel 2.3.

**Tabel 2.3 Kelarutan Gas dalam Air**

<b>Gas</b>	<b>Kelarutan (gram/100 gram air)</b>
<i>Carbon dioxide</i>	0,169
<i>Carbon monoxide</i>	0,0028
<i>Nitrogen dioxide</i>	10,19
<i>Sulfur dioxide</i>	11,28

*Sumber: Kaye and Laby, 1986*

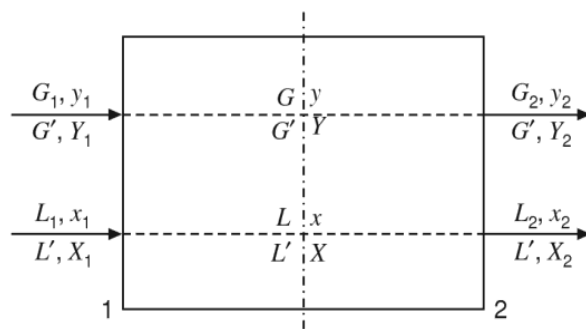
### **2.3 Wet Scrubber**

*Wet scrubber* adalah istilah yang digunakan untuk menggambarkan variasi alat yang menggunakan cairan untuk membuang polutan. Pada *wet scrubber* arus gas kotor dibawa menuju kontak dengan cairan pencuci dengan cara menyemprotkan mengalirkannya atau dengan metode kontak lainnya (Putra, 2010). *Wet scrubber* biasanya dipasang pada bagian lanjutan dari instalasi yang *outlet*-nya mengeluarkan emisi, dikarenakan instalasinya bertujuan untuk mengendalikan emisi yang keluar dari instalasi tersebut.

Prinsip kerja *wet scrubber* yaitu membuang partikel dengan cara menangkapnya dalam tetesan (*droplet*). Sedangkan pada polutan gas prinsip *wet scrubber* adalah dengan melarutkan atau menyerap polutan ke dalam *liquid*. Kemampuan *wet scrubber* untuk mengumpulkan partikulat berukuran kecil seringkali berhubungan langsung dengan *input power scrubber*. *Wet scrubber* yang membuang polutan gas disebut *absorber*. Kontak gas dengan *liquid* yang baik sangat penting untuk menghasilkan efisiensi pembuangan yang tinggi pada *absorber*.

Beberapa faktor dapat mempengaruhi proses penangkapan partikel seperti ukuran partikel, ukuran *droplet liquid*, temperatur, dan kecepatan relatif partikel dengan *droplet liquid*. Pada umumnya *wet scrubber* mampu menghasilkan partikel dengan diameter ukuran yang sangat kecil yaitu sekitar

$\pm 5 \mu$ . Pada prinsipnya *wet scrubber* didesain untuk menyediakan kontak yang baik antara *liquid* dan gas kotor. Salah satu contoh konfigurasi *wet scrubber* dengan mekanisme *co-current*. *Wet scrubber* menggunakan mekanisme *co-current* yang artinya sistem aliran emisi gas yang masuk sejajar dengan aliran air. Dalam merancang sistem kontrol absorpsi yang pertama kali dilakukan adalah menentukan laju aliran dan komposisi setiap aliran yang memasuki sistem. Dalam hukum kekekalan massa disebutkan bahwa, “apa yang masuk harus sama dengan yang keluar” seperti pada Gambar 2.3.



**Gambar 2.3 Diagram Aliran Co-Current**

(Sumber: Gerald T. Joseph, 1998)

Kesetimbangan massa yang terjadi pada aliran *co-current* dapat digambarkan dengan persamaan 2.3 yaitu:

$$G_1 y_1 + L_1 x_1 = G_2 y_2 + L_2 x_2 \quad (2.3)$$

dimana:

$G$  = laju alir molar gas, g-mol/jam

$L$  = laju alir molar cair, g-mol/jam

$y$  = fraksi mol zat terlarut dalam gas

$x$  = fraksi mol zat terlarut dalam cair

### 2.3.1 Media Filter

Pada proses absorpsi media filter sangat berpengaruh karena merupakan sebagai penyedia luas permukaan tempat mengalirnya larutan absorben pada saat terjadinya reaksi perpindahan massa (John. C. Mycook dkk, 1995). Tetesan-tetesan (*droplet*) dari absorben memiliki kecenderungan setelah jatuh dalam jarak tertentu akan bergabung menjadi satu dengan yang lainnya (aglomerasi), sehingga

akan dapat mengurangi luas kontak dengan aliran gas. Hal ini yang mendasari penggunaan media filter pada proses absorpsi.

Penyusunan media filter dapat dilakukan dengan dua cara yaitu penyusunan secara acak (*moving bed*) dan penyusunan secara teratur (*fixed bed*). Pada penyusunan secara acak, media filter hanya dituang tanpa ditata dimasukkan ke dalam kolom dengan susunan media filter menjadi acak. Jenis media yang umumnya digunakan untuk *moving bed* yaitu *rasching ring*, *lessing ring*, *pall ring*, dan *pingpong ball* (Cheremisinof N Paul, 1993). Penyusunan media filter secara acak dapat memberikan luas permukaan yang lebih luas dan dapat mencegah adanya penyumbatan tetapi dapat mengakibatkan terjadinya *pressure drop* yang lebih besar dari pada penyusunan media filter secara teratur (John C. Mycook dkk, 1995).

Penyusunan media filter secara teratur (*fixed bed*) dilakukan dengan cara memasukkan media satu persatu dan secara perlahan agar didapatkan susunan media filter yang teratur. Penyusunan media filter secara teratur dapat memberikan distribusi liquid lebih baik melalui seluruh permukaan media, serta *pressure drop* yang dihasilkan rendah. Tetapi penyusunan media secara teratur akan membutuhkan biaya yang lebih tinggi dari pada penyusunan secara acak (McCabe dkk, 1993).

Ketebalan media filter (*bed depth*) dapat mempengaruhi kinerja dari absorpsi. Kedalaman media filter yang lebih besar dapat membantu meningkatkan efisiensi dari *scrubber*. Ketebalan media filter yang diinginkan ditentukan berdasarkan target dari efisiensi pengurangan untuk polutan. Namun penambahan ketebalan media filter dapat meningkatkan *pressure drop*.

Menurut Koto (2016) *pressure drop* dapat disebabkan oleh adanya gesekan dan gravitasi perubahan kecepatan. *Pressure drop* adalah penurunan tekanan yang akan mengakibatkan adanya hambatan aliran ketika gas buang mengalir dari satu titik ke titik lainnya. Hambatan aliran ini biasanya disebabkan oleh adanya gesekan dan turbulensi.

### 2.3.2 Venturi Vacuum

*Venturi vacuum* merupakan sebuah pipa yang memiliki penampang di bagian tengahnya lebih sempit dan diletakkan mendatar dilengkapi dengan pipa pengendali untuk mengetahui permukaan air yang ada sehingga besarnya tekanan dapat diperhitungkan. Dalam pipa *venturi* ini luas penampang pipa pada bagian tepi memiliki penampang yang lebih luas daripada bagian tengahnya atau diameter pipa bagian tepi lebih besar daripada bagian tengahnya (Suprpto dkk, 2017).

Besar tekanan yang dihasilkan oleh *venturi* dipengaruhi oleh pertambahan kecepatan aliran akibat dari pengecilan penampang saluran yang mengikuti prinsip Bernoulli. Kecepatan aliran pada saluran dipengaruhi oleh debit yang dihasilkan oleh pompa yang mengikuti hukum kontinuitas. Selain kecepatan, tekanan input saluran juga merupakan faktor yang mempengaruhi tekanan pada vakum *venturi* (Takwim dkk, 2018).

Pada penelitian Mubarak dalam Takwim dkk (2018) menjelaskan pengaruh variabel tekanan dan debit aliran fluida pendorong terhadap kinerja *venturi*. Hasilnya variabel tekanan fluida yang masuk ke dalam *venturi* sangat mempengaruhi kinerja *venturi* di mana semakin besar tekanan fluida pendorong maka tekanan vakum akan semakin rendah. Prinsip kerja *venturi* adalah memperkecil penampang melintang pipa yang dilalui fluida, beda tekanan yang terjadi digunakan untuk menentukan laju aliran fluida yang melalui pipa.

Pada prinsip Bernoulli zat cair dialirkan melalui pipa yang penampangnya lebih besar lalu akan mengalir melalui pipa yang memiliki penampang yang lebih sempit, dengan demikian maka akan terjadi perubahan kecepatan (Giles, 1984). Tabung *venturi* dibagi menjadi 2 jenis, yaitu *venturi* tanpa manometer dan *venturi* dengan manometer. Prinsip kerja *venturi* tanpa manometer berdasarkan Asas Bernoulli “pada pipa mendatar (horizontal) tekanan fluida yang paling besar adalah pada bagian kelajuan alirnya paling kecil dan tekanan paling kecil adalah pada bagian kelajuan alirnya paling besar”.

Sedangkan prinsip kerja *venturi* dengan manometer adalah aplikasi gabungan antara *venturi* meter dan tabung pitot yang berfungsi untuk mengukur laju fluida.

Persamaan Bernoulli:

$$P_1 \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g h_1 = P_2 \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g h_2 \quad (2.4)$$

Karena tabungnya horizontal maka  $h_1 = h_2$ , sehingga

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 \quad (2.5)$$

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2} (\rho v_2^2 - \rho v_1^2) \quad (2.6)$$

Persamaan Kontinuitas:

$$A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2 \quad (2.7)$$

$$v_2 = \frac{A_1 v_1}{A_2} \quad (2.8)$$

Persamaan *venturi* tanpa manometer

$$v_1 = \frac{\sqrt{2gh}}{\sqrt{\left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2 - 1}} \quad (2.9)$$

Persamaan *venturi* dengan manometer

$$v_1 = A_2 \sqrt{\frac{2(\rho' - \rho)gh}{\rho(A_1^2 - A_2^2)}} \quad (2.10)$$

dimana:

P = tekanan (1 Pa = 1 N/m<sup>2</sup>)

$\rho$  = massa jenis zat (kg/m<sup>3</sup>)

v = kecepatan aliran (m/s)

g = percepatan gravitasi (m/s<sup>2</sup>)

h = tinggi (m)

A = luas penampang (m<sup>2</sup>)

Pada *wet scrubber* didesain dengan penambahan *venturi vacuum* untuk meningkatkan efisiensi kinerja dari reaktor. *Venturi scrubber* dianggap sebagai salah satu perangkat yang paling efektif untuk menghilangkan polutan gas dari gas buang atau mengumpulkan partikel

padat (Khairumizan, 2008). Desain *venturi* dibuat dengan menggunakan energi dari aliran gas masuk untuk mengatomisasi air yang akan digunakan untuk menyaring aliran gas. *Venturi scrubber* menggunakan prinsip diferensial antara gas yang memiliki kecepatan yang tinggi dan aliran beban dari air untuk membuat droplet-droplet yang akan menangkap pengotor dan membuat pengotor terkumpul dan dialirkan ke pembuangan (cerobong). Desain *venturi scrubber* memiliki beberapa keuntungan seperti efisiensi tinggi untuk partikel yang relatif kecil, biaya awal yang rendah, tidak ada bagian yang bergerak, volume kecil, dan kemudahan instalasi dan pemeliharaan.

### **2.3.3 Keunggulan dan Kelemahan *Wet Scrubber***

*Wet scrubber* memiliki keunggulan dan kelemahan menurut Gerald T. Joseph (1998).

Keunggulan:

1. *Wet scrubber* dapat mengurangi temperatur dan volume arus gas.
2. Tidak ada sumber pengotor kedua begitu partikel terkumpul, partikel tidak dapat keluar selama proses berjalan.
3. Dapat mengatasi gas dengan temperatur tinggi dan humiditas tinggi.
4. Minimal akan kecelakaan ledakan. Beberapa jenis pengotor kering mudah terbakar.
5. Memiliki desain sederhana tetapi memiliki efisiensi tinggi.
6. Memiliki desain sederhana tetapi memiliki efisiensi tinggi.

Kelemahan:

1. Air dan polutan terlarut dapat membentuk suatu senyawa asam yang sangat korosif.
2. Kebutuhan power tinggi. Efisiensi pembuangan tinggi untuk partikel padat hanya dapat dicapai pada *pressure drop* yang tinggi, yang berujung pada biaya operasi yang tinggi.
3. Kemungkinan dibutuhkan penetral limbah air bekas pencucian (untuk skala besar) agar tidak terjadi pencemaran lingkungan.

4. Gas buangan jenuh dapat menghasilkan gumpalan uap basah dan terlihat. Gas buangan menghasilkan kabut dan dapat menyebabkan masalah curah hujan lokal.
5. Partikel-partikel yang terkumpul mengandung senyawa yang telah terkontaminasi dan tidak dapat digunakan kembali.
6. Biaya *maintenance* cukup tinggi.

## 2.4 Baku Mutu

Emisi yang dikeluarkan dari hasil pembakaran (insinerasi) harus sesuai dengan standart baku mutu yang berlaku agar tidak menyebabkan pencemaran lingkungan. Berdasarkan Peraturan Pemerintah Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor P.70/Menlhk/Setjen/Kum.1/8/2016 mengenai baku mutu emisi usaha atau kegiatan pengolahan sampah secara termal dapat dilihat pada Tabel 2.4.

**Tabel 2.4 Baku Mutu Emisi Pengolahan Sampah secara Termal**

No.	Parameter	Satuan	Batas Maksimum
1.	Total Partikulat	mg/Nm <sup>3</sup>	120
2.	Sulfur Dioksida (SO <sub>2</sub> )	mg/Nm <sup>3</sup>	210
3.	Oksida Nitrogen (NO <sub>x</sub> )	mg/Nm <sup>3</sup>	470
4.	Hidrogen Klorida (HCl)	mg/Nm <sup>3</sup>	10
5.	Merkuri (Hg)	mg/Nm <sup>3</sup>	3
6.	Karbon Monoksida (CO)	mg/Nm <sup>3</sup>	625
7.	Hidrogen Fluorida (HF)	mg/Nm <sup>3</sup>	2
8.	Dioksin & Furan	mg/Nm <sup>3</sup>	0,1

Sumber: Permenlhk No. P.70 (2016)



## 2.5 Penelitian Terdahulu

**Tabel 2.5 Penelitian Terdahulu**

<b>Referensi</b>	<b>Variabel</b>	<b>Metode</b>	<b>Hasil</b>
Indra Koto (2016)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>pressure drop</i> pada debit air konstan 0,2808 liter/s</li> <li>- <i>pressure drop</i> pada debit udara konstan 0,4461 liter/s</li> <li>- pola aliran</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- aliran dua fase</li> <li>- debit udara konstan dan variasi air</li> <li>- variasi kenaikan debit dan variasi air</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- pada parameter aliran dua fase terjadi penurunan dan peningkatan <i>pressure drop</i></li> <li>- apabila debit udara konstan dan variasi air akan menyebabkan volume air bertambah yang menyebabkan fraksi hampa (vakum) mengecil dan <i>pressure drop</i> meningkat</li> <li>- variasi kenaikan debit dan variasi air akan menimbulkan terjadinya kenaikan dan penurunan <i>pressure drop</i> akibat perbedaan massa jenis</li> </ul>
Angga Purnama Putra (2010)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- laju optimum aliran air ke <i>venturi scrubber</i></li> <li>- perbandingan kontaminan organik (tar) pada setiap laju aliran</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- pengukuran laju aliran air ke dalam <i>venturi scrubber</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- empat variasi kondisi pengaturan katub reservoir utama dan variasi debit aliran tidak berpengaruh terhadap bentuk <i>flame</i> yang terjadi di <i>combustion unit</i></li> </ul>

Referensi	Variabel	Metode	Hasil
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- pengaruh <i>venturi scrubber</i> terhadap nyala <i>flame</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- pengukuran temperatur pada <i>combustion unit</i> dengan laju alir air</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- debit aliran optimum dalam menangkap parameter tar menghasilkan warna air lebih pekat</li> <li>- terbentuk ukuran-ukuran <i>droplet</i> yang optimum untuk menangkap tar dengan ratio <i>liquid to gas</i> yang tepat</li> </ul>
Septian Hadi S. (2019)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- jenis plastik pirolisis</li> <li>- resirkulasi dan non resirkulasi</li> <li>- suhu ruang bakar pirolisis dan suhu ruang bakar <i>incinerator</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- pirolisis</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- energi panas insinerasi dapat digunakan untuk proses pirolisis dengan suhu minimal ruang bakar insinerasi 500°C agar dapat memanaskan reaktor pirolisis dengan suhu 200°C</li> <li>- resirkulasi gas hasil pirolisis mempengaruhi kenaikan suhu tertinggi sebesar 50°C serta terjadinya fluktuatif</li> <li>- produk yang dihasilkan dari pirolisis terbaik terjadi pada proses</li> </ul>

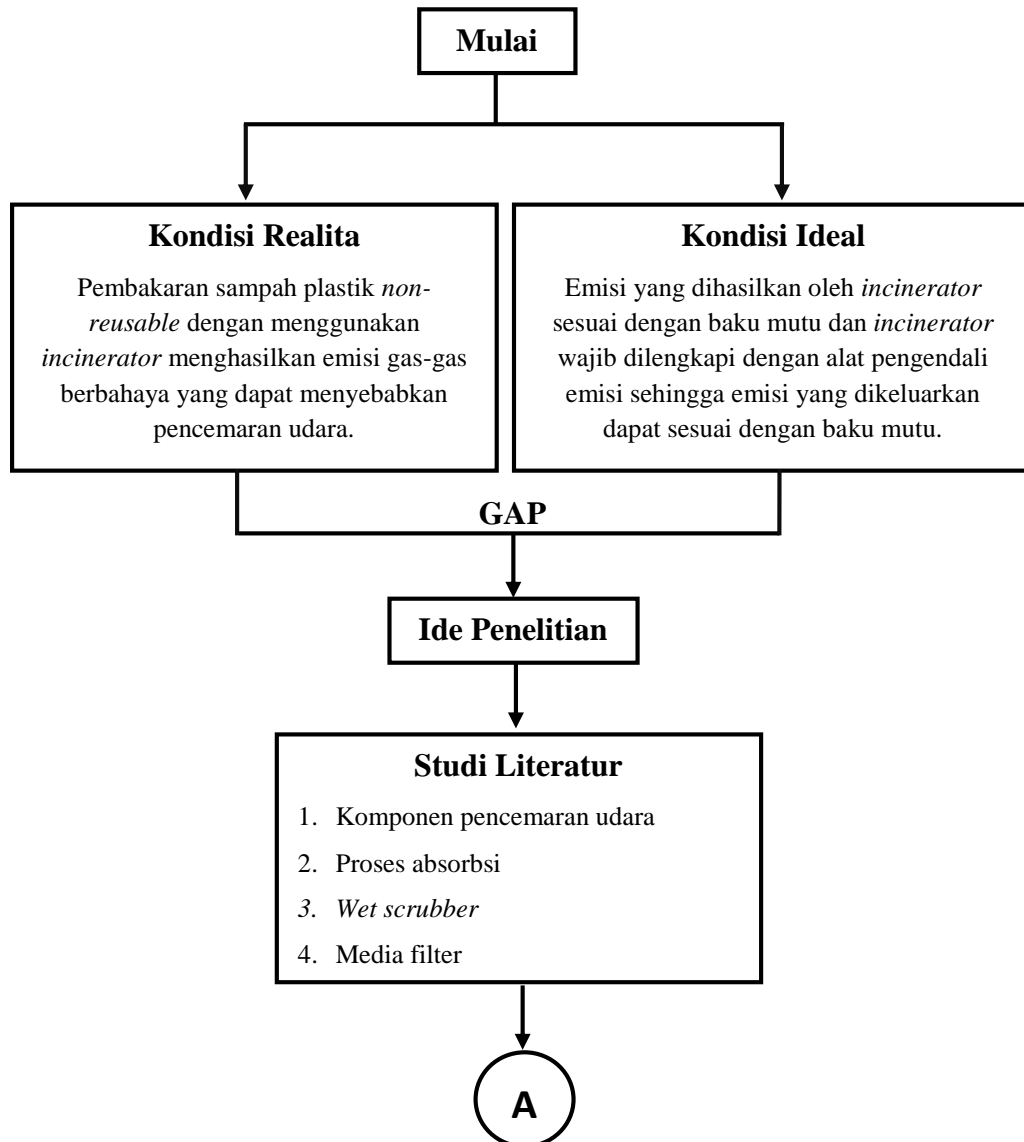
Referensi	Variabel	Metode	Hasil
			pirolisis dengan waktu pengukuran optimum selama 120 menit
Lilil Qurrotul Ain (2019)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- bentuk media <i>packing</i> (kelereng dan pipa)</li> <li>- ketebalan media <i>packing</i></li> <li>- ukuran media <i>packing</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>two stage packing tower scrubber</i> untuk <i>trapping</i> emisi <i>incinerator</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- variasi bentuk media <i>packing</i> berpengaruh terhadap efisiensi penurunan emisi dari <i>incinerator</i></li> <li>- semakin kecil ukuran media yang digunakan akan memperbesar efisiensi penurunan emisi parameter CO, CO<sub>2</sub>, NO, SO<sub>2</sub></li> <li>- variasi ketebalan media <i>packing</i> berpengaruh terhadap efisiensi penurunan emisi dari <i>incinerator</i></li> </ul>
Jafari M. J. (2012)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- variabel kecepatan aliran udara (5,10,15 L/s)</li> <li>- konsentrasi ammonia (25±3, 42±3 dan 57±3 ppm)</li> <li>- pH (5,6,7)</li> <li>- L/G = 0,6</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- absorbat : ammonia</li> <li>- absorben : larutan kaustik</li> <li>- bed : PVC dan <i>raching ring</i></li> <li>- reaktor : <i>counter flow packed columns</i> diameter 20 cm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- nilai efisiensi removal ammonia menggunakan parameter PVC tidak sebaik menggunakan parameter <i>raching ring</i></li> <li>- PVC memiliki kelebihan yang lain seperti berat yang ringan, <i>headloss</i> rendah, dan harga yang terjangkau</li> </ul>

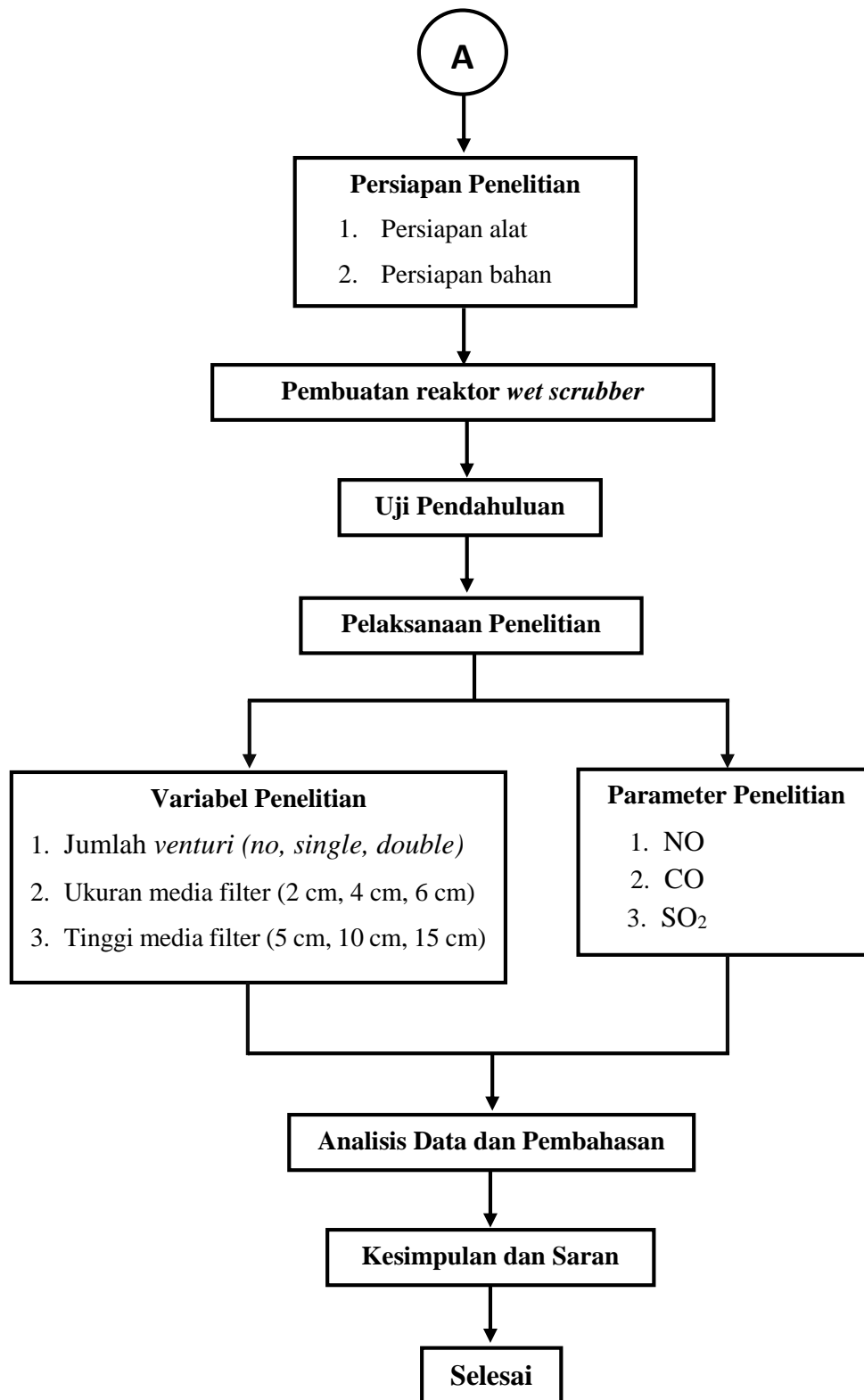
<b>Referensi</b>	<b>Variabel</b>	<b>Metode</b>	<b>Hasil</b>
Suryaningtyas (2006)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- diameter media <i>packed</i> (4 cm, 6 cm, 8 cm)</li> <li>- tinggi media <i>packed</i> ( 30 cm, 40 cm, 50 cm)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- absorbat : SO<sub>2</sub></li> <li>- absorben : H<sub>2</sub>O (30 L) + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (6 mL)</li> <li>- bed : bola plastik</li> <li>- reaktor : diameter 32 cm, tinggi 80 cm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- variabel diameter 4 cm dengan tinggi 50 cm memiliki efisiensi penyisihan gas SO<sub>2</sub> tertinggi yaitu sebesar 98%</li> </ul>
Abdul Haris (2010)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- diameter media bed : 2 mm, 3 mm, 4 mm</li> <li>- tekanan : 20 psi, 30 psi, 40 psi</li> <li>- jumlah kolom : 1, 2, 3</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- absorbat : debu padi</li> <li>- absorben : H<sub>2</sub>O</li> <li>- reaktor pipa PVC diameter 5,5 cm, tinggi tiap kolom 15 cm</li> <li>- bed : selang plastik panjang 2,5 cm</li> <li>- <i>countercurrent gravity tower with packed bed non-circulation</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- diameter bed 2 mm, 3 mm, dan 4 mm memiliki efisiensi penurunan debu padi masing-masing 87,52%, 76,76%, dan 74,06%</li> <li>- jumlah kolom 1, 2, dan 3 memiliki efisiensi penyisihan debu masing-masing 76,21%, 78,49%, dan 83,64%</li> <li>- tekanan 20 psi, 30 psi, dan 40 psi memiliki penurunan debu masing-masing 78,73%, 81,94%, dan 77,66%</li> </ul>

## BAB 3 METODE PENELITIAN

### 3.1 Kerangka Penelitian

Metode penelitian digunakan sebagai acuan untuk memudahkan dalam melakukan penelitian. Metode penelitian disajikan dalam bentuk kerangka penelitian yang berisi rangkaian pokok kegiatan yang akan dilakukan dalam penelitian dari awal hingga selesai. Kerangka penelitian digunakan untuk menggambarkan langkah kerja yang sistematis dan terencana sehingga dapat meminimalisir kesalahan yang mungkin dapat timbul. Adapun kerangka penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.1.





Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

### 3.2 Metode Penelitian

Penelitian ini mengenai kajian penurunan kandungan emisi *incinerator* dengan menggunakan sistem *three-stage filter wet scrubber*. Pemilihan

reaktor dengan sistem *three-stage filter wet scrubber* untuk menghindari adanya *plugging* yang sering terjadi pada *single-stage filter wet scrubber* pada penelitian yang dilakukan Charles dan Baukal (2004). Penelitian ini secara umum menggunakan metode deskriptif kuantitatif. Metode deskriptif kuantitatif digunakan untuk mendeskripsikan hasil data primer yang didapatkan. Data-data yang didapatkan berdasarkan percobaan penelitian dianalisis berdasarkan studi literatur. Penelitian ini dilakukan untuk mengkaji efisiensi alat *wet scrubber* dalam penurunan emisi yang dikeluarkan oleh *incinerator* dengan bahan bakar plastik jenis *polypropylene* (PP).

### 3.3 Studi Literatur

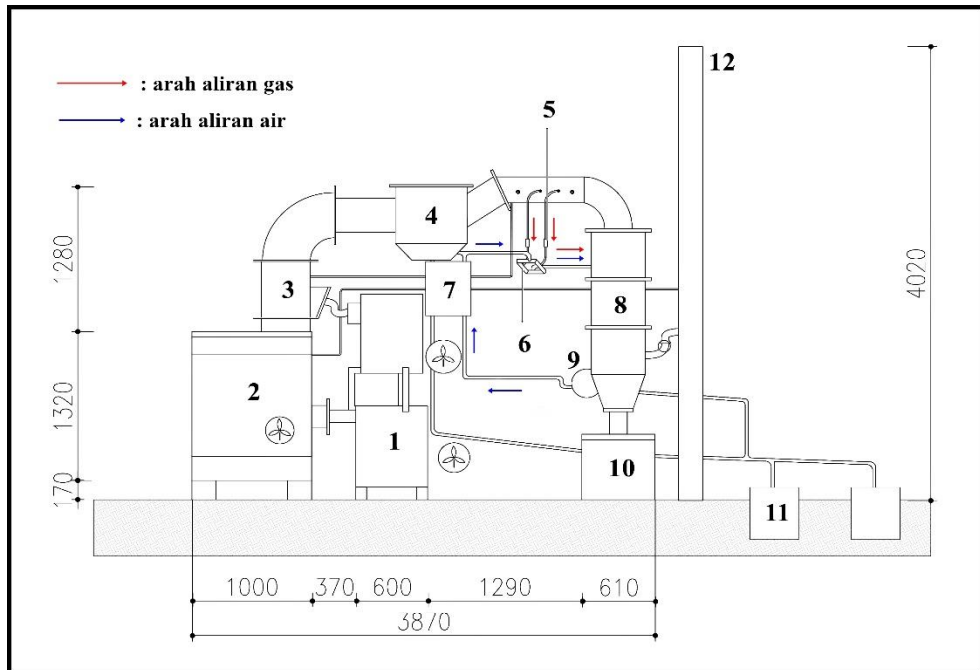
Studi literatur terkait penelitian tentang materi-materi *wet scrubber*, mekanisme absorpsi, *packed column tower*, dan media filter dilakukan dengan tujuan untuk menambah pemahaman dalam rangka mendukung penelitian yang akan dilakukan sebagai acuan dasar teori, penentuan variabel penelitian, dan parameter penelitian yang digunakan sebagai dasar analisis dan pembahasan penelitian. Studi literatur yang diperlukan dalam penelitian ini menggunakan peraturan perundangan, jurnal penelitian, laporan penelitian, *textbook*, tugas akhir terdahulu, dan makalah yang berkaitan.

### 3.4 Persiapan Penelitian

Persiapan penelitian meliputi persiapan alat dan bahan untuk desain *wet scrubber*. *Wet scrubber* yang dibuat adalah jenis *co-current packed column tower* dengan *three-stage filter*. *Co-current* adalah jenis *scrubber* dengan sistem aliran emisi gas yang masuk sejajar dengan aliran air. Gas buang hasil pengolahan keluar melalui *outlet* dan air sisa pengolahan akan keluar pada bak penampung air limbah.

Emisi yang dikeluarkan oleh *incinerator* memiliki temperatur tinggi dan mengandung gas-gas yang berbahaya sisa dari pembakaran plastik. Sebelum dialirkan ke dalam *wet scrubber*, gas yang bersuhu tinggi dialirkan ke dalam *heat exchanger* untuk diturunkan suhunya. Kemudian gas dialirkan ke dalam kolom *scrubber* melalui pipa *venturi vacuum* dan di dalam kolom

*scrubber* akan bersentuhan dengan media filter yang dibuat dengan sistem *three-stage filter*. Di dalam kolom *scrubber* gas akan mengalami kontak dengan tetesan (*droplet*) yang dipercikkan dari *nozzle spray* kemudian gas akan mengalir menuju *outlet wet scrubber*. Desain *wet scrubber* dapat dilihat pada gambar 3.2.



**Gambar 3.2 Desain Wet Scrubber**

Keterangan gambar:

1. *Burner*
2. *Primary chamber*
3. *Secondary chamber*
4. *Heat exchanger*
5. *Flowmeter*
6. *Venturi vacuum*
7. *Panel thermocouple*
8. *Wet scrubber column*
9. *Water pump*
10. Bak air limbah
11. Bak air bersih
12. Cerobong *outlet*



### 3.4.1 Persiapan Alat dan Bahan

A. Alat yang digunakan dalam penelitian berupa reaktor dengan bagian-bagian sebagai berikut:

1. *Incinerator*

*Incinerator* yang digunakan adalah *incinerator* tipe *batch* dengan kapasitas pembakaran 10 kg/jam sampah plastik. Volume ruang bakar sebesar 0,3 m<sup>3</sup>. Bahan bakar *incinerator* menggunakan plastik *non-reusable* jenis *polypropylene* (PP). Bahan bakar *incinerator* menggunakan briket arang batok dan kayu yang dimasukkan ke dalam ruang bakar (*burner*). Sampah plastik dengan jumlah 1 kg akan dibakar pada *primary chamber* dan kemudian akan mengalami proses pembakaran hingga didapatkan sisa pembakaran dalam satu waktu. *Incinerator* tipe ini terdiri dari tiga bagian utama yaitu *burner*, *primary chamber*, dan *secondary chamber*.

2. *Heat exchanger*

Emisi gas keluaran dari *incinerator* dialirkan ke dalam *wet scrubber* melewati *heat exchanger*. *Heat exchanger* berfungsi untuk menurunkan temperatur gas tinggi yang keluar dari *incinerator* menuju ke dalam *wet scrubber* menjadi temperatur yang lebih rendah.

3. *Venturi Vacuum*

Jumlah *venturi vacuum* sebanyak dua unit. *Venturi vacuum* berfungsi untuk menarik emisi hasil pembakaran dari *incinerator* masuk ke dalam aliran air dari pipa dengan tekanan dari *water pump* kemudian dialirkan ke dalam *packed tower scrubber*. Penggunaan *venturi vacuum* bertujuan untuk memperbesar efisiensi kinerja dari reaktor *wet scrubber*.

4. *Water pump*

*Water pump* berfungsi untuk memompa air ke dalam *wet scrubber* dari dalam tanki air bersih. *Water pump* yang digunakan yaitu *water pump* dengan daya 250 watt 220 volt

dengan kapasitas 25 liter/menit. Jenis air yang dipompa berupa air PDAM.

5. *Flowmeter*

Kecepatan aliran gas yang masuk ke dalam *packed tower scrubber* diatur dengan menggunakan valve pada rangkaian reaktor dan diukur dengan menggunakan *flowmeter*. Besar kecepatan aliran optimum yang masuk disesuaikan kriteria *flowmeter* yaitu F-ArR 03K dengan besar aliran 11-13 CFH.

6. *Thermocouple*

*Thermocouple* yang digunakan yaitu tipe K untuk mengukur temperatur pada gas yang keluar dari *incinerator* dan gas yang masuk ke dalam *packed tower scrubber*. Temperatur yang masuk dikondisikan 500° C – 800° C dengan *thermocouple* kapasitas 1000° C.

7. *Stopwatch*

*Stopwatch* digunakan untuk menandai waktu *running* setiap percobaan dilakukan. Percobaan dilakukan selama 10 menit pada setiap waktu *running*.

8. pH meter

pH meter digunakan untuk mengetahui nilai pH pada air *output* (air limbah) hasil dari proses penyisihan polutan di dalam reaktor *wet scrubber*.

9. *Wet scrubber column*

*Wet scrubber column* berbahan baja yang berfungsi sebagai tempat berlangsungnya proses penyisihan polutan dengan media filter. Reaktor berbentuk silinder dengan ukuran diameter 60 cm dan terdiri dari tiga kompartemen sebagai tempat media filter berupa pipa PVC.

10. Media filter

Media filter berfungsi sebagai tempat terjadinya kontak antara emisi gas dengan air. Media filter yang digunakan adalah pipa PVC ukuran 0,5 inch dengan ukuran dimensi 2 cm, 4 cm, dan 6

cm. Bentuk media filter dipilih berdasarkan pada karakteristiknya dalam hal kekuatan, ketahanan terhadap korosi, harga yang terjangkau serta bentuk media filter mudah didapatkan di pasaran. Variasi tinggi media filter divariasikan 5 cm, 10 cm, dan 15 cm. Media filter dimasukkan secara acak pada media penahan filter yang terletak di dalam *column* dengan sistem *three-stage filter* dengan masing-masing variasi yang telah ditentukan.

#### 11. *Gas analyzer*

*Gas Analyzer* adalah peralatan instrumentasi yang digunakan untuk mengukur kandungan emisi gas dari *incinerator* dan gas keluaran dari *wet scrubber*. *Gas analyzer* yang digunakan di sini adalah *Gas Analyzer Sensonic type 1400*. Komponen emisi yang diukur antara lain: NO, CO dan SO<sub>2</sub>.

#### 12. Bak penampung limbah

Bak penampung limbah berfungsi sebagai bak penampung air sisa pengolahan yang keluar dari *packed tower*.

#### B. Bahan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

##### 1. Air PDAM

Air yang digunakan sebagai absorben dalam percobaan ini yaitu air dari Perusahaan Daerah Air Minum (PDAM) yang didistribusikan ke dalam reaktor melalui pipa dengan *water pump*.

##### 2. Plastik *non-reusable* jenis *polypropylene* (PP)

Kondisi plastik yang digunakan terbebas dari kandungan air (*extra water 0%*).

### 3.5 Uji Pendahuluan

Uji pendahuluan dilakukan untuk mengetahui kestabilan alat sebelum digunakan percobaan penelitian. Uji pendahuluan juga digunakan untuk mengetahui kondisi optimum alat (reaktor) selama penelitian dilakukan agar tidak terjadi kendala pada saat pelaksanaan uji penelitian.

### 3.6 Pelaksanaan Penelitian

Pelaksanaan penelitian dilakukan di halaman Teknik Lingkungan Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

#### 3.6.1 Variasi Variabel Penelitian

Penelitian dilakukan berdasarkan tiga variabel yaitu:

1. Variasi jumlah *venturi* yaitu menggunakan *no venturi vacuum*, *single venturi vacuum* dan *double venturi vacuum*.
2. Variasi ukuran media filter berupa pipa PVC yaitu 2 cm, 4 cm, dan 6 cm. Pemilihan media filter berdasarkan ukuran optimum untuk media filter yaitu pipa PVC ukuran 0,5 inch dengan ukuran media filter 2,5 – 5 cm (Sahwan, 2019).
3. Variasi tinggi media filter yaitu 5 cm, 10 cm, 15 cm. Variasi tinggi media filter divariasikan berdasarkan tinggi optimum yaitu 15 – 30 cm (Lee, 2000).

#### 3.6.2 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian dan pengukuran yang akan dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan dan menimbang plastik jenis PP sebesar 1 kg sebagai bahan bakar *incinerator*.
2. Memasukkan bahan plastik jenis PP ke dalam *primary chamber*.
3. Menyusun reaktor sesuai dengan variasi penelitian yang diperlukan (menyusun kebutuhan jumlah *venturi*, menyusun ukuran media filter, dan menyusun tinggi media filter).
4. Menyalakan *burner* sebagai pemicu api di dalam *primary chamber*.
5. Menyalakan *blower* sebagai pemasok udara agar api tetap menyala selama pembakaran berlangsung.
6. Menyalakan *water pump* untuk mendistribusikan air ke reaktor.
7. Emisi pembakaran dari *incinerator* mengalir menuju *heat exchanger* melalui pipa reaktor.
8. Memantau dan mencatat nilai suhu pada *thermocouple* yang terletak pada *primary chamber*.

9. Mengatur laju aliran udara yang masuk ke dalam *wet scrubber* dengan mengatur nilai debit gas pada *flowmeter*.
10. Memantau dan mencatat nilai suhu pada *thermocouple* yang terletak pada *inlet* sebelum ke *wet scrubber*.
11. Mengatur laju aliran air yang masuk ke dalam *wet scrubber*.
12. Menyalakan *stopwatch* dan melakukan pengukuran.
13. Memantau dan mencatat nilai emisi gas pada *inlet* dan *outlet wet scrubber* setiap menit pada *gas analyzer* dalam kurun waktu 10 menit dengan pembakaran 1 kg plastik jenis PP.

### 3.7 Pengukuran Parameter Penelitian

Pengukuran parameter penelitian yang dilakukan menggunakan *alat gas analyzer*. Parameter yang diuji yaitu emisi NO, CO dan SO<sub>2</sub>. Parameter emisi yang diukur pada *inlet* dan *oulet* dengan tiga variabel yang berbeda. Sehingga didapatkan variasi percobaan seperti pada Tabel 3.1.

**Tabel 3.1 Variasi Percobaan Penelitian**

Jumlah Venturi	Ukuran Dimensi Media	Tinggi Media Filter		
		TM1	TM2	TM3
WNV	UM1	WNV;UM1;TM1	WNV;UM1;TM2	WNV;UM1;TM3
	UM2	WNV;UM2;TM1	WNV;UM2;TM2	WNV;UM2;TM3
	UM3	WNV;UM3;TM1	WNV;UM3;TM2	WNV;UM3;TM3
WSV	UM1	WSV;UM1;TM1	WSV;UM1;TM2	WSV;UM1;TM3
	UM2	WSV;UM2;TM1	WSV;UM2;TM2	WSV;UM2;TM3
	UM3	WSV;UM3;TM1	WSV;UM3;TM2	WSV;UM3;TM3
WDV	UM1	WDV;UM1;TM1	WDV;UM1;TM2	WDV;UM1;TM3
	UM2	WDV;UM2;TM1	WDV;UM2;TM2	WDV;UM2;TM3
	UM3	WDV;UM3;TM1	WDV;UM3;TM2	WDV;UM3;TM3

Keterangan:

Jumlah Venturi:

WNV = *Wet Scrubber No Venturi*

WSV = *Wet Scrubber Single Venturi*

WDV = *Wet Scrubber Double Venturi*

Ukuran Dimensi Media:

UM1 = 2 cm

UM2 = 4 cm

UM3 = 6 cm

Tinggi Media Filter:

TM1 = 5 cm

TM2 = 10 cm

TM3 = 15 cm

### 3.8 Analisis Data dan Pembahasan

Analisis dan pembahasan dilakukan berdasarkan dari hasil data penelitian serta didukung dengan literatur yang ada. Analisis yang dilakukan meliputi pengaruh jumlah *venturi*, pengaruh ukuran media filter, dan pengaruh tinggi media filter terhadap efisiensi removal pada setiap gas emisi (NO, CO, dan SO<sub>2</sub>). Perhitungan efisiensi penyisihan polutan gas dilakukan dengan pengukuran dari nilai *inlet* dan *outlet* dengan menggunakan persamaan 3.1 berikut:

$$\eta = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} \times 100\% \quad (3.1)$$

dimana:

$\eta$  = efisiensi removal emisi gas (%)

$C_{in}$  = besar konsentrasi gas yang masuk (ppm)

$C_{out}$  = besar konsentrasi gas yang keluar (ppm)

Interaksi hubungan antara variabel penelitian diuji menggunakan uji statistik *One-way Anova*. Pemakaian jenis pengujian ini berdasarkan pada nilai signifikansi tiap variasi. Di dalam uji *One-way Anova*, hubungan setiap variabel akan diuji dengan uji *univariate* yaitu suatu analisis untuk menguji perbedaan data lebih dari dua kelompok.

Pengolahan data tersebut diolah dengan menggunakan program *IBM Statistics SPSS 20*. Untuk mengetahui adanya pengaruh antar variasi variabel yang diuji terhadap efisiensi *scrubber* digunakan uji statistik dengan tingkat keyakinan 90%. Digunakan besaran 90% berdasarkan penelitian Haris (2011) yang menggunakan besaran yang sama. Apabila nilai hasil uji statistik kurang

dari tingkat keyakinan sebesar 90% dengan nilai  $\alpha$  0,1 maka dapat ditarik kesimpulan statistik terhadap hipotesis yang diajukan adalah dapat diterima.

### **3.9 Kesimpulan dan Saran**

Kesimpulan disusun berdasarkan hasil analisis data dan pembahasan dari penelitian yang telah dilakukan. Kesimpulan merupakan jawaban dari tujuan penelitian yang telah dipaparkan sebelumnya. Saran dimaksudkan sebagai ulasan dan masukan yang dapat digunakan sebagai perbaikan untuk penelitian selanjutnya yang berhubungan dengan penelitian ini.

**“Halaman ini sengaja dikosongkan”**



## BAB 4

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Nilai Emisi Gas Hasil Percobaan Penelitian

Percobaan penelitian dilakukan untuk melihat kemampuan reaktor dalam menurunkan emisi gas hasil pembakaran sampah plastik *non-reusable* jenis *polypropylene* (PP) dengan *incinerator*. Kemampuan reaktor dianalisis berdasarkan efisiensi penyisihan tiap emisi. Nilai sampel yang diambil dari emisi hasil pembakaran *incinerator* selama 10 menit yang masuk ke dalam *wet scrubber* sebagai gas *inlet* dan *outlet* dengan variabel pertama pengaruh jumlah *venturi vacuum* dengan variasi yaitu *no venturi vacuum*, *single venturi vacuum*, dan *double venturi vacuum*. Penggunaan *venturi* pada *wet scrubber* dapat meningkatkan efisiensi pada *wet scrubber* (Khairumizan, 2008). Waktu pembakaran selama 10 menit berdasarkan uji pendahuluan pada reaktor dengan pembakaran 1 kg plastik *non-reusable* jenis *polypropylene* (PP) pada *incinerator*. Ternyata pada *thermocouple* menunjukkan penurunan suhu mendekati menit ke-10 dan setelah menit ke-10 suhu menurun secara drastis, hal tersebut menandakan bahwa plastik sudah habis terbakar dan efisiensi reaktor menurun. Sehingga didapatkan waktu penelitian selama 10 menit.

Variabel kedua adalah ukuran media filter berupa pipa PVC dengan variasi ukuran yaitu 2 cm, 4 cm, dan 6 cm. Pemilihan media filter berdasarkan ukuran optimum untuk media filter *wet scrubber* yaitu pipa PVC ukuran 0,5 inch dengan ukuran media filter 2,5 – 5 cm (Sahwan, 2019). Variabel ketiga adalah tinggi media filter dengan variasi tinggi yaitu 5 cm, 10 cm, dan 15 cm. Variasi tinggi media filter divariasikan berdasarkan tinggi optimum pada penelitian yaitu 15 – 30 cm (Lee, 2000).

Parameter yang akan diteliti adalah kadar NO, CO dan SO<sub>2</sub> pada *inlet* dan *outlet* reaktor *wet scrubber*. Penurunan emisi menggunakan reaktor *three-stage filter* pada sistem *wet scrubber* dengan variasi *venturi vacuum*. Pemilihan reaktor dengan *three-stage filter* untuk menghindari adanya *plugging* yang sering terjadi pada *single-stage filter* (Charles dan Baukal,

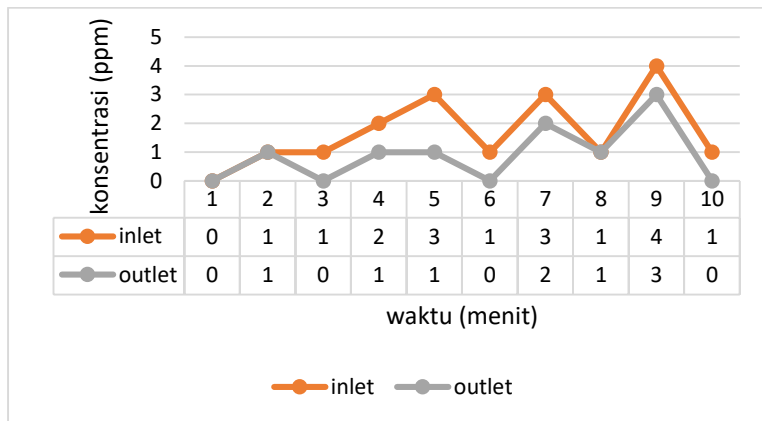
2004). Kinerja dari reaktor *wet scrubber* dalam penelitian ini dilihat dari nilai efisiensi removal gas hasil emisi *incinerator*. Semakin besar nilai efisiensi yang dihasilkan menandakan bahwa kinerja dari reaktor *wet scrubber* bertambah baik (Jafari, 2012).

#### 4.1.1 Nilai Emisi pada Reaktor *No Venturi Vacuum*

Nilai emisi pada reaktor *no venturi vacuum* rata-rata menghasilkan nilai konsentrasi (ppm) yang tidak konstan, adanya kenaikan dan penurunan atau dapat dikatakan fluktuatif. Dari ketiga parameter (NO, CO, dan SO<sub>2</sub>) pada reaktor *no venturi vacuum* perubahan konsentrasi yang paling signifikan terjadi pada SO<sub>2</sub> karena SO<sub>2</sub> mempunyai nilai kelarutan yang paling tinggi dalam air (Kaye dan Laby, 1986).

Pada Gambar 4.1 merupakan contoh grafik yang terbentuk antara nilai konsentrasi (ppm) emisi gas NO pada *inlet* dan *outlet*. Percobaan dengan variabel reaktor *no venturi vacuum* dengan ukuran media filter 2 cm dan tinggi media filter 5 cm terlihat bahwa terjadi kenaikan dan penurunan yang fluktuatif pada tiap menit percobaan. Dapat dilihat nilai konsentrasi *inlet* mengalami kenaikan tertinggi pada menit ke-9 sebesar 4 ppm dan *outlet* mengalami kenaikan tertinggi pada menit ke-9 sebesar 3 ppm. Keseluruhan grafik pada setiap variasi terlampir pada Lampiran 4.

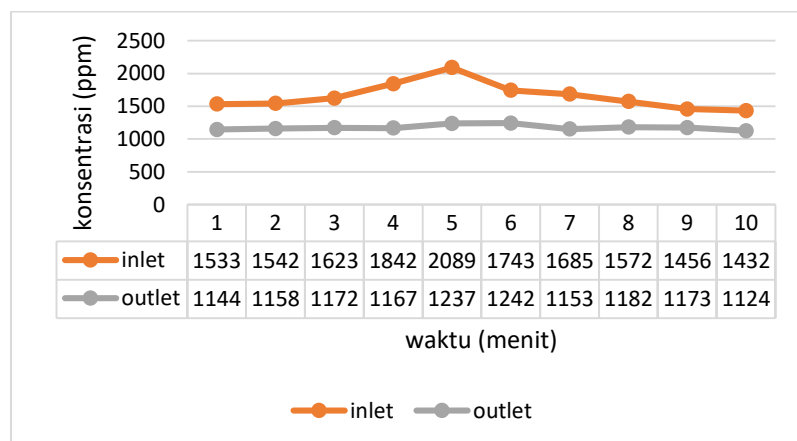
Perhitungan selisih parameter NO konsentrasi massa *inlet* dan *outlet* didapatkan nilai sebesar 0,8 ppm. Hal tersebut menunjukkan adanya penurunan kandungan emisi gas dari *inlet* ke *outlet*, sehingga didapatkan nilai efisiensi sebesar 47,06%. Selisih nilai emisi secara keseluruhan terlampir pada Lampiran 1.



**Gambar 4.1** Nilai Emisi NO *No Venturi Vacuum*

Pada Gambar 4.2 merupakan contoh grafik yang terbentuk antara nilai konsentrasi (ppm) emisi gas CO pada *inlet* dan *outlet*. Percobaan dengan variabel reaktor *no venturi vacuum* dengan ukuran media filter 2 cm dan tinggi media filter 5 cm. Dapat dilihat bahwa nilai konsentrasi *inlet* tertinggi terjadi pada menit ke-5 yaitu sebesar 2089 ppm dan nilai konsentrasi *inlet* terendah 1432. Sedangkan nilai *outlet* tertinggi terjadi pada menit ke-6 yaitu sebesar 1242 dan nilai *outlet* terendah yaitu sebesar 1124. Keseluruhan grafik pada setiap variasi terlampir pada Lampiran 4.

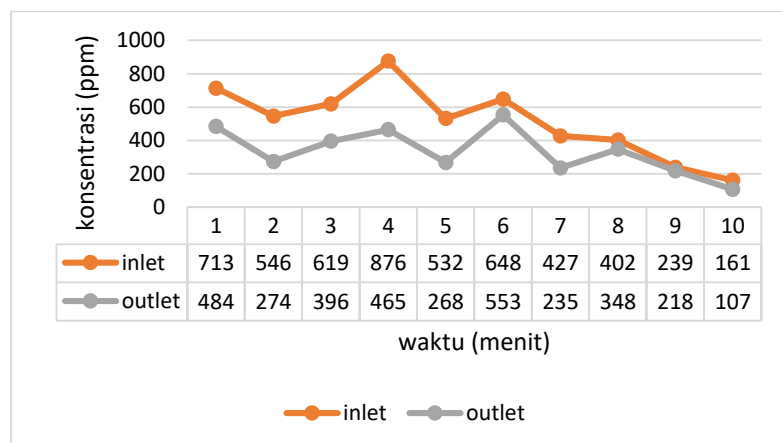
Perhitungan selisih parameter CO konsentrasi massa *inlet* dan *outlet* didapatkan nilai sebesar 476,5 ppm. Hal tersebut menunjukkan adanya penurunan kandungan emisi gas dari *inlet* ke *outlet*, sehingga didapatkan nilai efisiensi sebesar 28,85%. Selisih nilai emisi secara keseluruhan terlampir pada Lampiran 1.



**Gambar 4.2** Nilai Emisi CO *No Venturi Vacuum*

Pada Gambar 4.3 merupakan contoh grafik yang terbentuk antara nilai konsentrasi (ppm) emisi gas SO<sub>2</sub> pada *inlet* dan *outlet*. Percobaan dengan variabel reaktor *no venturi vacuum* dengan ukuran media 2 cm dan tinggi media 5 cm terlihat bahwa terjadi kenaikan dan penurunan yang fluktuatif pada tiap menit percobaan. Dapat dilihat bahwa nilai konsentrasi *inlet* tertinggi terjadi pada menit ke-4 yaitu sebesar 876 ppm dan nilai konsentrasi *inlet* terendah sebesar 161. Sedangkan nilai konsentrasi *outlet* tertinggi terjadi pada menit ke-6 sebesar 648 dan nilai konsentrasi *outlet* terendah sebesar 107. Keseluruhan grafik pada setiap variasi terlampir pada Lampiran 4.

Perhitungan selisih parameter SO<sub>2</sub> konsentrasi massa *inlet* dan *outlet* didapatkan nilai sebesar 186,25 ppm. Hal tersebut menunjukkan adanya penurunan kandungan emisi gas dari *inlet* ke *outlet*, sehingga didapatkan nilai efisiensi sebesar 43,77%. Selisih nilai emisi secara keseluruhan terlampir pada Lampiran 1. Dari ketiga parameter pada variabel ukuran media filter 2 cm dan tinggi media filter dengan menggunakan reaktor *no venturi vacuum*, nilai efisiensi yang paling tinggi adalah pada parameter SO<sub>2</sub> karena SO<sub>2</sub> mempunyai nilai kelarutan yang paling tinggi daripada nilai kelarutan NO dan CO (Kaye dan Laby, 1986).



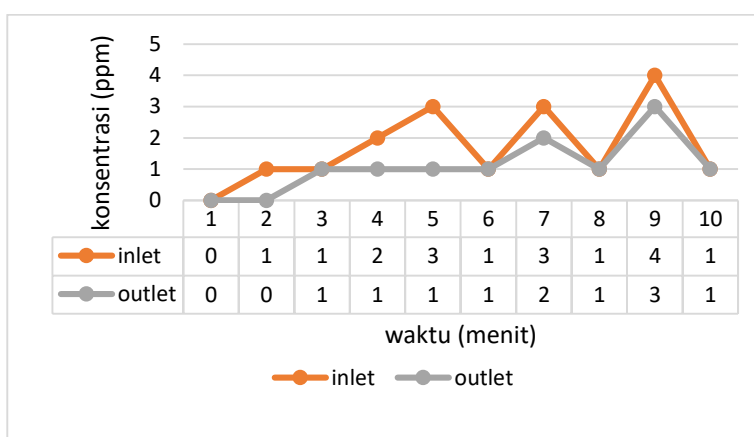
Gambar 4.3 Nilai Emisi SO<sub>2</sub> No Venturi Vacuum

#### 4.1.2 Nilai Emisi pada Reaktor *Single Venturi Vacuum*

Nilai emisi pada reaktor *single venturi vacuum* rata-rata konsentrasi mulai naik pada menit ke-4 dan mulai menurun pada menit ke-8 hal itu menunjukkan bahwa percobaan yang dilakukan selama 10 menit dengan pembakaran plastik *non-reusable* sudah mulai habis terbakar pada *incinerator* sehingga emisi gas yang masuk ke dalam *wet scrubber* sudah mulai berkurang dengan ditandai nilai konsentrasi mulai menurun pada menit tersebut. Dari ketiga parameter (NO, CO, dan SO<sub>2</sub>) pada reaktor *single venturi vacuum* parameter NO mempunyai nilai konsentrasi yang tidak stabil dari menit ke-5 dan pada menit ke-6 turun tetapi pada menit ke-7 mulai naik lagi dan menit ke-8 turun lagi. Hal itu dapat disebabkan karena NO mempunyai nilai kelarutan yang cukup tinggi di bawah SO<sub>2</sub>.

Pada Gambar 4.4 merupakan contoh grafik yang terbentuk antara nilai konsentrasi (ppm) emisi gas NO pada *inlet* dan *outlet*. Percobaan dengan variabel reaktor *single venturi vacuum* dengan ukuran media filter 2 cm dan tinggi media filter 5 cm. Dapat dilihat bahwa adanya kenaikan dan penurunan yang fluktuatif dengan nilai konsentrasi *inlet* tertinggi terjadi pada menit ke-9 yaitu sebesar 4 ppm dan nilai *outlet* tertinggi terjadi pada menit ke-9 yaitu sebesar 3. Sedangkan nilai tertinggi konsentrasi *outlet* terjadi pada menit ke-9 sebesar 3 dan nilai konsentrasi *outlet* terendah sebesar 1. Keseluruhan grafik pada setiap variasi terlampir pada Lampiran 4.

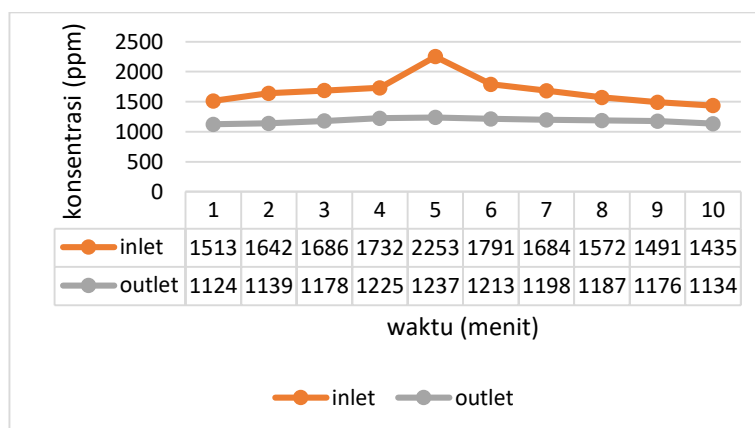
Perhitungan selisih parameter NO konsentrasi massa *inlet* dan *outlet* didapatkan nilai sebesar 0,6 ppm. Hal tersebut menunjukkan adanya penurunan kandungan emisi gas dari *inlet* ke *outlet*, sehingga didapatkan nilai efisiensi sebesar 35,29%. Selisih nilai emisi secara keseluruhan terlampir pada Lampiran 1.



Gambar 4.4 Nilai Emisi NO Single Venturi Vacuum

Pada Gambar 4.5 merupakan contoh grafik yang terbentuk antara nilai konsentrasi (ppm) emisi gas CO pada *inlet* dan *outlet*. Percobaan dengan variabel reaktor *single venturi vacuum* dengan ukuran media filter 2 cm dan tinggi media filter 5 cm terlihat bahwa terjadi kenaikan nilai konsentrasi *inlet* paling tinggi pada menit ke-5 sebesar 2253 ppm dan nilai konsentrasi *inlet* terendah 1435. Sedangkan nilai konsentrasi *outlet* tertinggi sebesar 1237 dan nilai konsentrasi *outlet* terendah sebesar 1134. Keseluruhan grafik pada setiap variasi terlampir pada Lampiran 4.

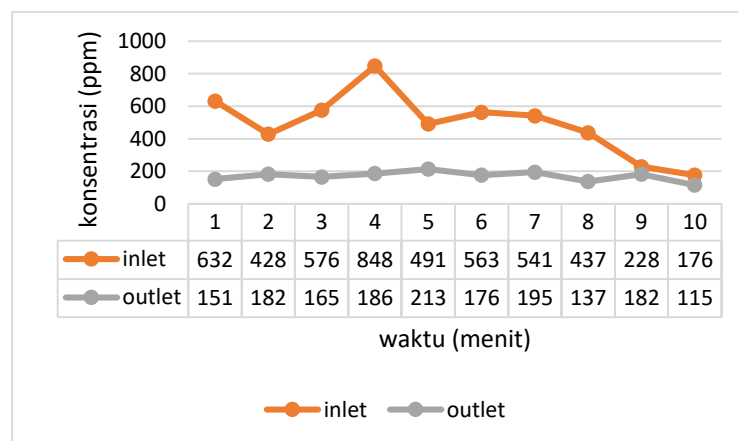
Perhitungan selisih parameter CO konsentrasi massa *inlet* dan *outlet* didapatkan nilai sebesar 498,8 ppm. Hal tersebut menunjukkan adanya penurunan kandungan emisi dari *inlet* ke *outlet*, sehingga didapatkan nilai efisiensi sebesar 29,69%. Selisih nilai emisi secara keseluruhan terlampir pada Lampiran 1.



Gambar 4.5 Nilai Emisi CO Single Venturi Vacuum

Pada Gambar 4.6 merupakan contoh grafik yang terbentuk antara nilai konsentrasi (ppm) emisi gas SO<sub>2</sub> pada *inlet* dan *outlet*. Percobaan dengan variabel reaktor *single venturi vacuum* dengan ukuran media filter 2 cm dan tinggi media filter 5 cm terlihat bahwa terjadi kenaikan nilai konsentrasi *inlet* tertinggi pada menit ke-4 sebesar 848 ppm dan nilai konsentrasi *inlet* terendah sebesar 176 ppm. Sedangkan nilai konsentrasi *outlet* tertinggi sebesar 213 dan nilai konsentrasi *outlet* terendah sebesar 115. Keseluruhan grafik pada setiap variasi terlampir pada Lampiran 4.

Perhitungan selisih parameter SO<sub>2</sub> konsentrasi massa *inlet* dan *outlet* didapatkan nilai sebesar 170,3 ppm. Hal tersebut menunjukkan adanya penurunan kandungan emisi gas dari *inlet* ke *outlet*, sehingga didapatkan nilai efisiensi sebesar 44,99%. Selisih nilai emisi secara keseluruhan terlampir pada Lampiran 1. Dari ketiga parameter pada variabel ukuran media filter 2 cm dan tinggi media filter dengan menggunakan reaktor *single venturi vacuum*, nilai efisiensi yang paling tinggi adalah pada parameter SO<sub>2</sub> karena SO<sub>2</sub> mempunyai nilai kelarutan yang paling tinggi daripada nilai kelarutan NO dan CO (Kaye dan Laby, 1986).



Gambar 4.6 Nilai Emisi SO<sub>2</sub> *Single Venturi Vacuum*

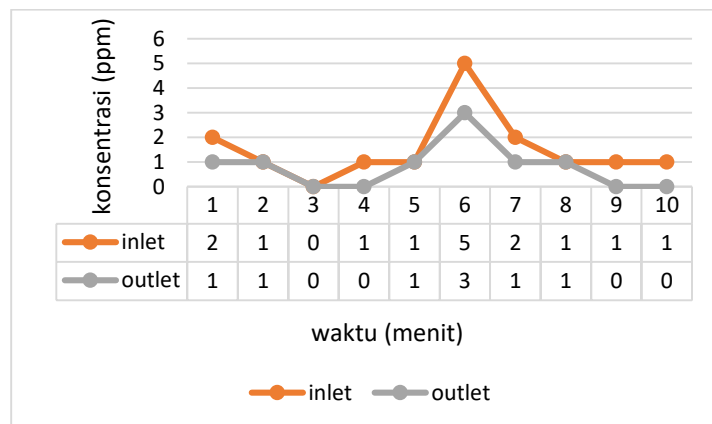
#### 4.1.3 Nilai Emisi pada Reaktor *Double Venturi Vacuum*

Nilai emisi pada reaktor *double venturi vacuum* rata-rata konsentrasi mulai naik pada menit ke-6 pada parameter NO dan menit ke-4 pada parameter SO<sub>2</sub>. Pada menit ke-7 dan ke-8 konsentrasi mulai

menurun hal itu menunjukkan bahwa percobaan yang dilakukan selama 10 menit dengan pembakaran plastik *non-reusable* sudah mulai habis terbakar pada *incinerator* sehingga emisi gas yang masuk ke dalam *wet scrubber* sudah mulai berkurang dengan ditandai nilai konsentrasi mulai menurun pada menit tersebut. Dari ketiga parameter (NO, CO, SO<sub>2</sub>) parameter CO tidak terlalu menunjukkan kenaikan dan penurunan yang signifikan karena CO mempunyai nilai kelarutan paling rendah di antara kedua parameter lainnya.

Pada Gambar 4.7 merupakan contoh grafik yang terbentuk antara nilai konsentrasi (ppm) emisi gas NO pada *inlet* dan *outlet*. Percobaan dengan variabel reaktor *double venturi vacuum* dengan ukuran media filter 2 cm dan tinggi media filter 5 cm terlihat bahwa terjadi kenaikan nilai konsentrasi *inlet* tertinggi pada menit ke-6 dengan nilai sebesar 5 ppm dan nilai konsentrasi *inlet* terendah sebesar 1. Sedangkan nilai konsentrasi *outlet* tertinggi pada menit ke-6 sebesar 3 dan nilai konsentrasi *outlet* terendah sebesar 0. Keseluruhan grafik pada setiap variasi terlampir pada Lampiran 4.

Perhitungan selisih parameter NO konsentrasi massa *inlet* dan *outlet* didapatkan nilai sebesar 0,7 ppm. Hal tersebut menunjukkan adanya penurunan kandungan emisi gas dari *inlet* ke *outlet*, sehingga didapatkan nilai efisiensi sebesar 46,67%. Selisih nilai emisi secara keseluruhan terlampir pada Lampiran 1.

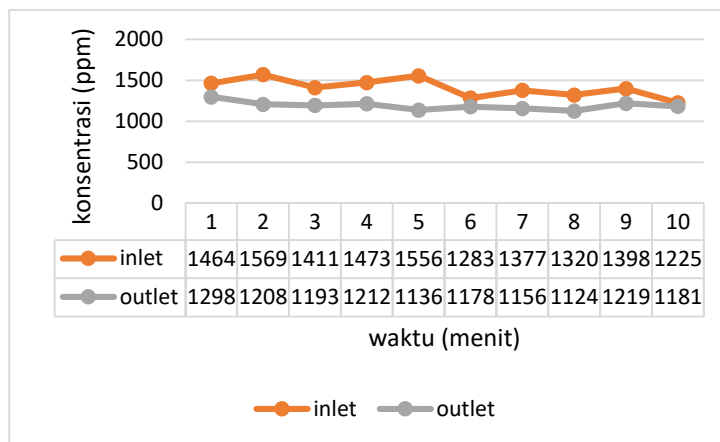


**Gambar 4.7 Nilai Emisi NO Double Venturi Vacuum**



Pada Gambar 4.8 merupakan contoh grafik yang terbentuk antara nilai konsentrasi (ppm) emisi gas CO pada *inlet* dan *outlet*. Percobaan dengan variabel reaktor *double venturi vacuum* dengan ukuran media filter 2 cm dan tinggi media filter 5 cm terlihat bahwa terjadi kenaikan dan penurunan yang fluktuatif. Dapat dilihat bahwa nilai konsentrasi *inlet* tertinggi pada menit ke-2 yaitu sebesar 1569 dan nilai konsentrasi *inlet* terendah sebesar 1225. Sedangkan nilai konsentrasi *outlet* tertinggi pada menit ke-3 sebesar 1193 dan nilai konsentrasi *outlet* terendah sebesar 1181. Keseluruhan grafik pada setiap variasi terlampir pada Lampiran 4.

Perhitungan selisih parameter CO konsentrasi massa *inlet* dan *outlet* didapatkan nilai sebesar 217,1 ppm. Hal tersebut menunjukkan adanya penurunan kandungan emisi gas dari *inlet* ke *outlet*, sehingga didapatkan nilai efisiensi sebesar 15,42%. Selisih nilai emisi secara keseluruhan terlampir pada Lampiran 1.

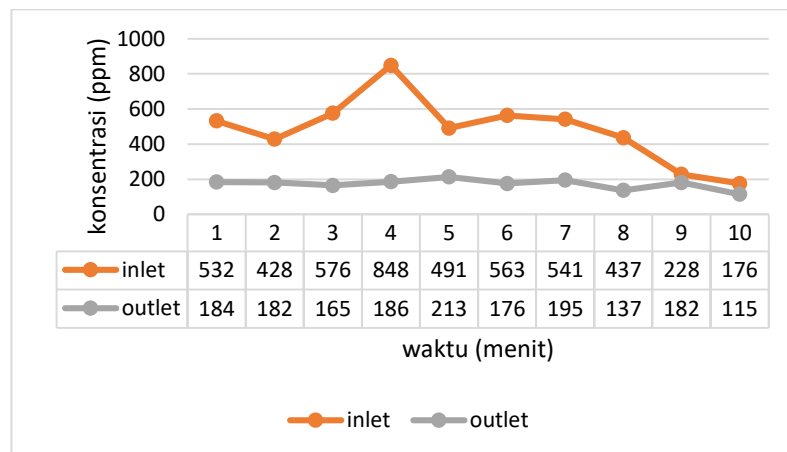


**Gambar 4.8 Nilai Emisi CO Double Venturi Vacuum**

Pada Gambar 4.9 merupakan contoh grafik yang terbentuk antara nilai konsentrasi (ppm) emisi gas SO<sub>2</sub> pada *inlet* dan *outlet*. Percobaan dengan variabel reaktor *double venturi vacuum* dengan ukuran media filter 2 cm dan tinggi media filter 5 cm. Dapat dilihat bahwa nilai konsentrasi *inlet* tertinggi terjadi pada menit ke-4 sebesar 848 dan nilai konsentrasi *inlet* terendah sebesar 176. Sedangkan nilai konsentrasi *outlet* tertinggi terjadi pada menit ke-5 sebesar 213 dan

nilai konsentrasi *outlet* terendah sebesar 115. Keseluruhan grafik pada setiap variasi terlampir pada Lampiran 4.

Perhitungan selisih parameter SO<sub>2</sub> konsentrasi massa *inlet* dan *outlet* didapatkan nilai sebesar 308,5 ppm. Hal tersebut menunjukkan adanya penurunan kandungan emisi gas dari *inlet* ke *outlet*, sehingga didapatkan nilai efisiensi sebesar 64%. Selisih nilai emisi secara keseluruhan terlampir pada Lampiran 1. Dari ketiga parameter pada variabel ukuran media filter 2 cm dan tinggi media filter 5 cm dengan menggunakan reaktor *double venturi vacuum*, nilai efisiensi yang paling tinggi adalah pada parameter SO<sub>2</sub> karena SO<sub>2</sub> mempunyai nilai kelarutan yang paling tinggi daripada nilai kelarutan NO dan CO (Kaye dan Laby, 1986).



Gambar 4.9 Nilai Emisi SO<sub>2</sub> Double Venturi Vacuum

## 4.2 Pengaruh Variabel Jumlah Venturi Vacuum

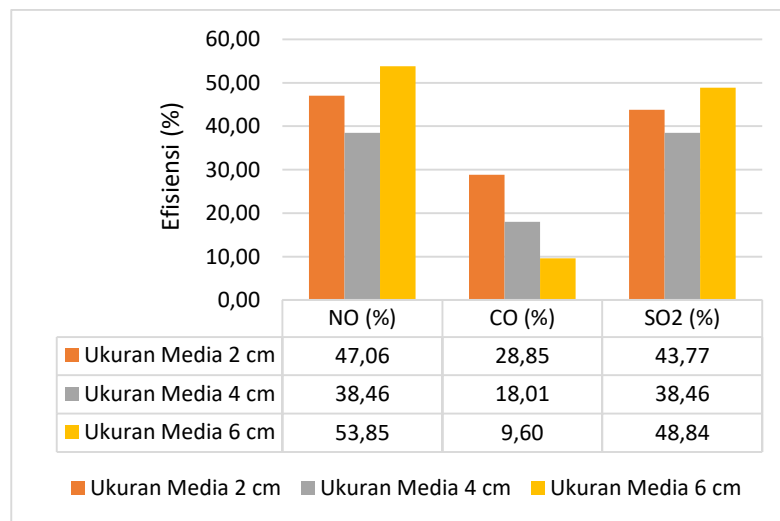
Variabel jumlah *venturi* yang digunakan pada proses penurunan emisi gas yang dihasilkan oleh *incinerator* adalah *no venturi vacuum*, *single venturi vacuum*, dan *double venturi vacuum*. Penggunaan *venturi* pada *wet scrubber* dapat meningkatkan efisiensi pada *wet scrubber* (Khairumizan, 2008).

### 4.2.1 Efisiensi Jumlah Venturi dengan Tinggi Media 5 cm

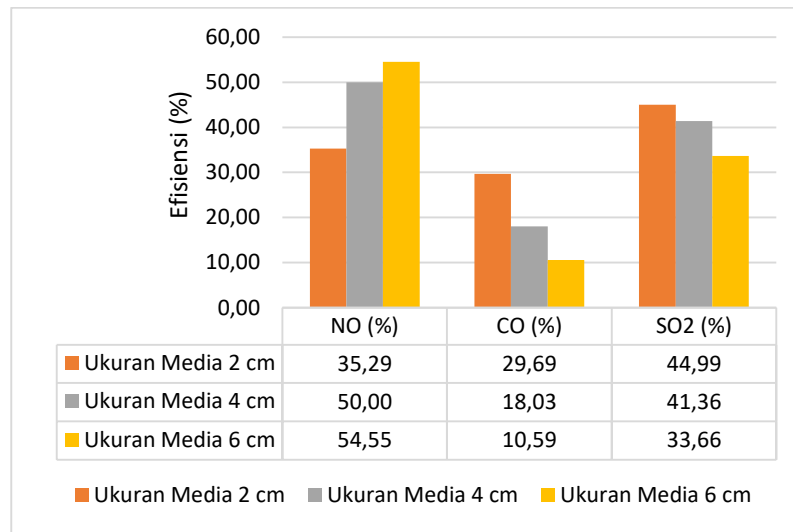
Pada Gambar 4.10 merupakan grafik efisiensi parameter dengan tinggi media 5 cm pada reaktor *no venturi vacuum*. Pada gambar 4.10 dapat dilihat bahwa nilai efisiensi yang paling tinggi yaitu pada

parameter NO yaitu sebesar 53,85% dengan menggunakan ukuran media 6 cm. Pada Gambar 4.11 merupakan grafik efisiensi parameter dengan tinggi media 5 cm pada reaktor *single venturi vacuum*. Pada gambar dapat dilihat bahwa pada variasi nilai efisiensi yang paling tinggi yaitu pada parameter NO yaitu sebesar 54,55% dengan menggunakan ukuran media 6 cm. Sedangkan pada Gambar 4.12 merupakan grafik efisiensi parameter dengan tinggi media 5 cm pada reaktor *double venturi vacuum* menunjukkan bahwa nilai efisiensi paling tinggi pada parameter SO<sub>2</sub> yaitu sebesar 64% dengan menggunakan ukuran media 2 cm.

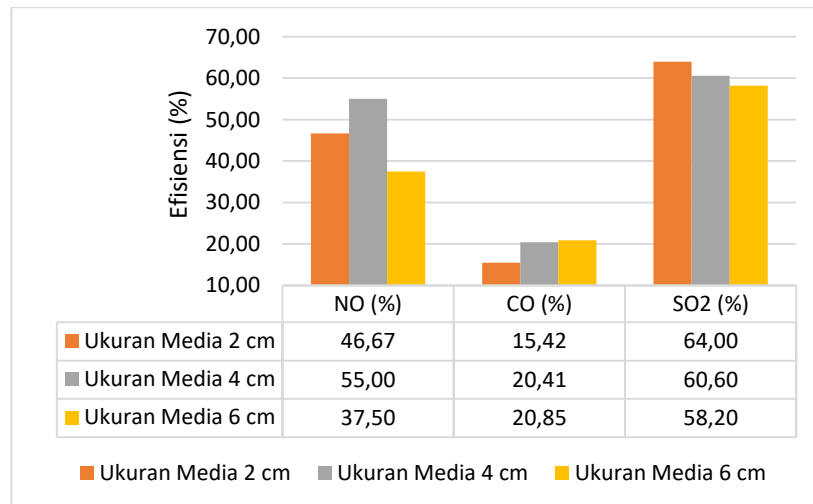
Pada variabel jumlah *venturi* dengan tinggi media 5 cm didapatkan nilai efisiensi tertinggi pada reaktor *double venturi vacuum* parameter SO<sub>2</sub> dengan ukuran media filter 2 cm. Hal tersebut disebabkan karena gas SO<sub>2</sub> memiliki tingkat kelarutan yang tinggi dalam air (absorben) yaitu sebesar 11,28 (Kaye dan Laby, 1986).



**Gambar 4.10 Efisiensi Variabel Tinggi Media 5 cm No Venturi Vacuum**



**Gambar 4.11 Efisiensi Variabel Tinggi Media 5 cm *Single Venturi Vacuum***



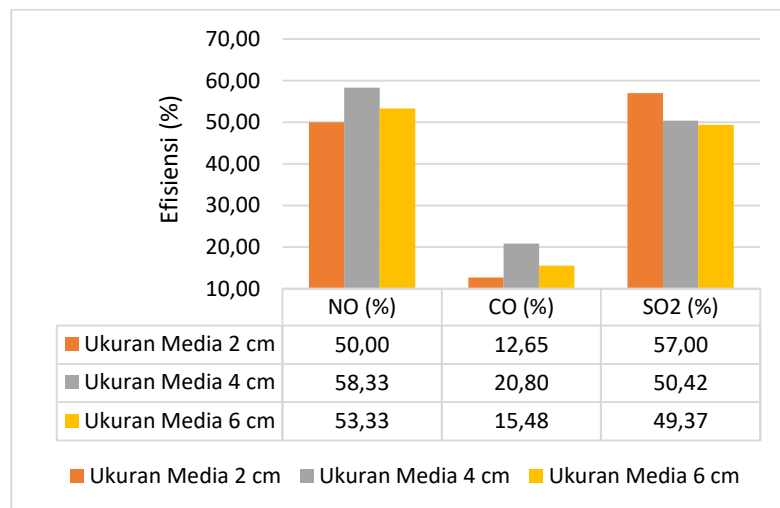
**Gambar 4.12 Efisiensi Variabel Tinggi Media 5 cm *Double Venturi Vacuum***

#### 4.2.2 Efisiensi Jumlah *Venturi* dengan Tinggi Media 10 cm

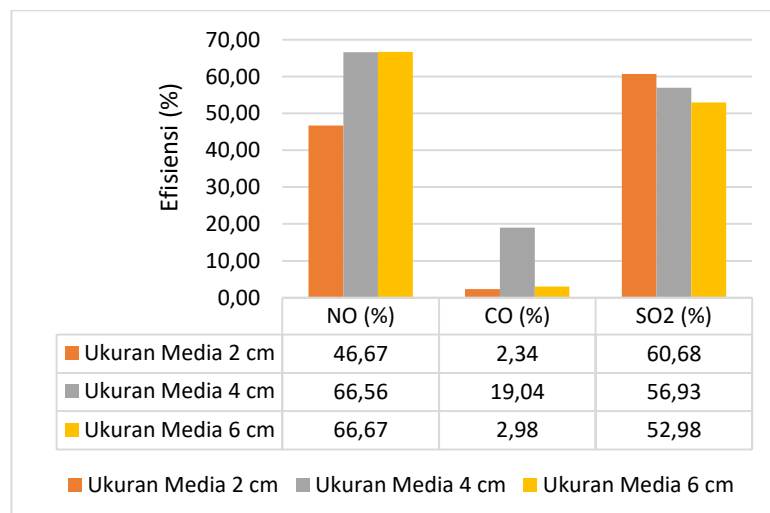
Pada Gambar 4.13 merupakan grafik efisiensi parameter dengan tinggi media 10 cm pada reaktor *no venturi vacuum*. Pada gambar dapat dilihat bahwa nilai efisiensi yang paling tinggi yaitu pada parameter NO yaitu sebesar 58,33% dengan menggunakan ukuran media 4 cm. Pada Gambar 4.14 merupakan grafik efisiensi parameter dengan tinggi media 10 cm pada reaktor *single venturi vacuum*. Pada gambar dapat dilihat bahwa pada variasi nilai efisiensi yang paling tinggi yaitu pada parameter NO yaitu sebesar 66,67% dengan menggunakan ukuran media 6 cm. Sedangkan pada Gambar 4.15 merupakan grafik efisiensi parameter dengan tinggi media 10 cm pada

reaktor *double venturi vacuum* menunjukkan bahwa nilai efisiensi paling tinggi pada parameter  $\text{SO}_2$  yaitu sebesar 59,63% dengan menggunakan ukuran media 6 cm.

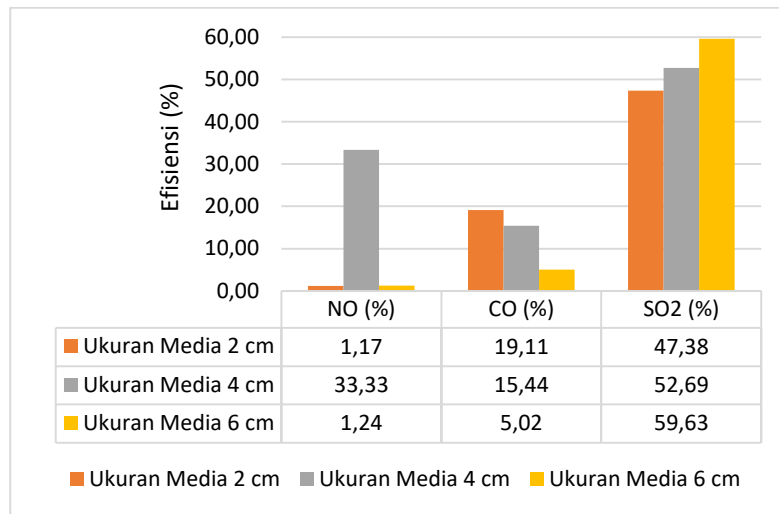
Pada variabel jumlah *venturi* dengan tinggi media 10 cm didapatkan nilai efisiensi tertinggi pada reaktor *single venturi vacuum* parameter NO dengan ukuran media filter 6 cm. Hal tersebut disebabkan karena gas NO memiliki tingkat kelarutan yang cukup tinggi di bawah  $\text{SO}_2$  dalam air (absorben) yaitu sebesar 10,19 (Kaye dan Laby, 1986).



Gambar 4.13 Efisiensi Variabel Tinggi Media 10 cm No Venturi Vacuum



Gambar 4.14 Efisiensi Variabel Tinggi Media 10 cm Single Venturi Vacuum

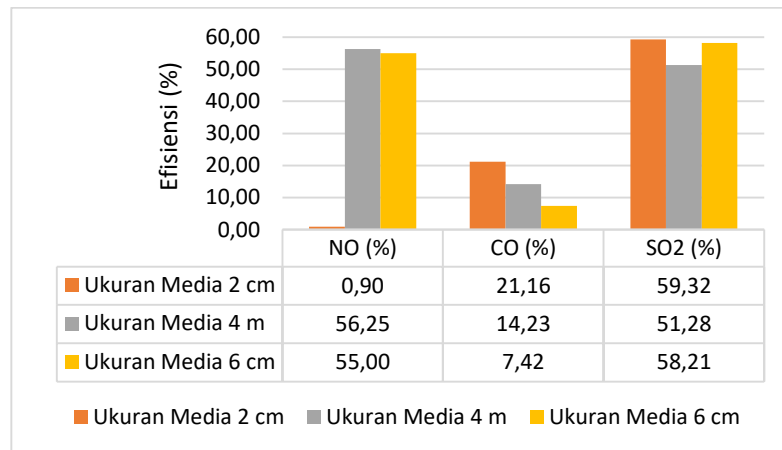


Gambar 4.15 Efisiensi Variabel Tinggi Media 10 cm *Double Venturi Vacuum*

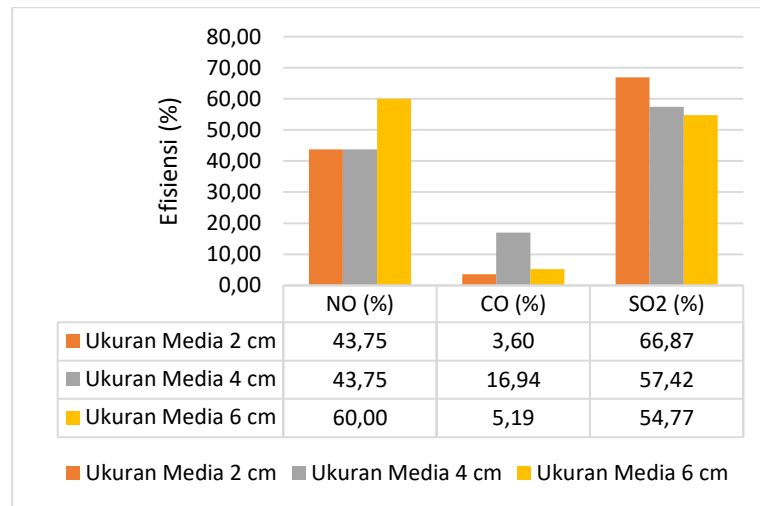
#### 4.2.3 Efisiensi Jumlah *Venturi* dengan Tinggi Media 15 cm

Pada Gambar 4.16 merupakan grafik efisiensi parameter dengan tinggi media 15 cm pada reaktor *no venturi vacuum*. Pada gambar dapat dilihat bahwa nilai efisiensi yang paling tinggi yaitu pada parameter  $\text{SO}_2$  yaitu sebesar 59,32% dengan menggunakan ukuran media 2 cm. Pada Gambar 4.17 merupakan grafik efisiensi parameter dengan tinggi media 15 cm pada reaktor *single venturi vacuum*. Pada gambar dapat dilihat bahwa pada variasi nilai efisiensi yang paling tinggi yaitu pada parameter  $\text{SO}_2$  yaitu sebesar 66,42% dengan menggunakan ukuran media 2 cm. Sedangkan pada Gambar 4.18 merupakan grafik efisiensi parameter dengan tinggi media 15 cm pada reaktor *double venturi vacuum* menunjukkan bahwa nilai efisiensi paling tinggi pada parameter  $\text{SO}_2$  yaitu sebesar 47,1% dengan menggunakan ukuran media 4 cm.

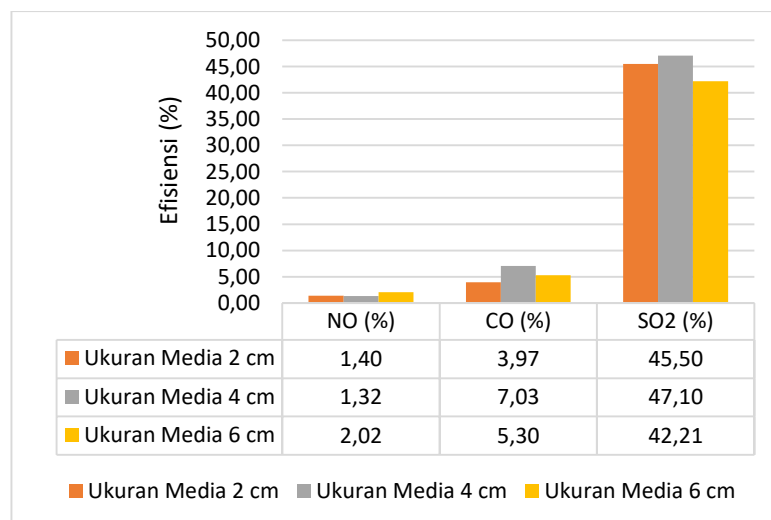
Pada variabel jumlah *venturi* dengan tinggi media 15 cm didapatkan nilai efisiensi tertinggi pada reaktor *single venturi vacuum* parameter  $\text{SO}_2$  dengan ukuran media filter 2 cm. Hal tersebut disebabkan karena gas  $\text{SO}_2$  memiliki tingkat kelarutan yang tinggi dalam air (absorben) yaitu sebesar 11,28 (Kaye dan Laby, 1986).



Gambar 4.16 Efisiensi Variabel Tinggi Media 15 cm *No Venturi Vacuum*



Gambar 4.17 Efisiensi Variabel Tinggi Media 15 cm *Single Venturi Vacuum*



Gambar 4.18 Efisiensi Variabel Tinggi Media 15 cm *Double Venturi Vacuum*

Dari variabel jumlah *venturi* dapat disimpulkan reaktor yang paling efisien dalam menurunkan emisi yaitu dengan menggunakan *reaktor single venturi*. Didapatkan nilai efisiensi tertinggi pada penurunan emisi gas parameter NO dan SO<sub>2</sub> dengan menggunakan reaktor *single venturi*. Hal tersebut dikarenakan penggunaan *venturi* pada reaktor *wet scrubber* lebih efisien dalam penurunan emisi daripada tanpa menggunakan *venturi* (Khairumizan, 2008). Penggunaan reaktor *double venturi* kurang efisien karena kurangnya tekanan fluida (air) sebagai absorben dalam mengalirkan emisi gas di dalam reaktor. Hal tersebut disebabkan terlalu kecilnya tekanan *water pump* yaitu sebesar 25 L/min. Tekanan *water pump* optimum dalam mengalirkan emisi gas ke dalam reaktor adalah sebesar 30 L/min (Ain, 2019).

Variabel jumlah *venturi* dapat mempengaruhi efisiensi pada reaktor yang digunakan dalam penurunan emisi gas. Adanya penambahan *venturi* dapat meningkatkan kecepatan dan memberikan efek tarik gas yang tinggi (Takwim, 2018). Penyempitan penampang pada *venturi* akan menambah kecepatan air yang mengalir sebagai absorben dan efek vakum menjadi semakin tinggi sehingga dapat dengan mudah terjadi absorpsi. Pada proses absorpsi terjadi perpindahan massa atau biasa disebut dengan transfer massa antara fase gas ke cair. Proses perpindahan massa dipengaruhi oleh jenis gas, semakin tinggi nilai kelarutan gas maka akan semakin mudah gas tersebut larut dalam absorben. Kelarutan gas umumnya akan berkurang pada temperatur yang lebih tinggi (Khoerunnisa, 2008).

Pada parameter yang diuji emisi gas yang mempunyai nilai efisiensi paling tinggi adalah SO<sub>2</sub> yaitu sebesar 66,87% pada reaktor *single venturi vacuum*. Hal tersebut dikarenakan gas SO<sub>2</sub> mudah larut dalam air karena memiliki kelarutan yang tinggi terhadap air. Selain terlarut dalam air, gas SO<sub>2</sub> juga dapat terserap oleh embun yang terbentuk di reaktor. Hal tersebut juga dibuktikan pada penelitian Zhang (2011) yang menurunkan kandungan SO<sub>2</sub> di Cina pada kondisi tidak berembun dan berembun. Penurunan gas SO<sub>2</sub> memperlihatkan hasil bahwa gas SO<sub>2</sub> pada kondisi tidak berembun dapat menurun hingga 25 ppbv, sedangkan pada kondisi berembun gas SO<sub>2</sub> dapat menurun hingga 6,8 ppbv. Selain itu gas SO<sub>2</sub> juga mudah larut dalam air



sehingga dapat meningkatkan nilai efisiensi (Charles dan Baukal, 2004). Hal ini juga diperkuat oleh penelitian Kaye dan Laby (1986) bahwa dari beberapa jenis emisi gas seperti SO<sub>2</sub>, NO, dan CO yang memiliki nilai kelarutan paling tinggi dalam air pada kondisi 1 atm adalah emisi gas SO<sub>2</sub>.

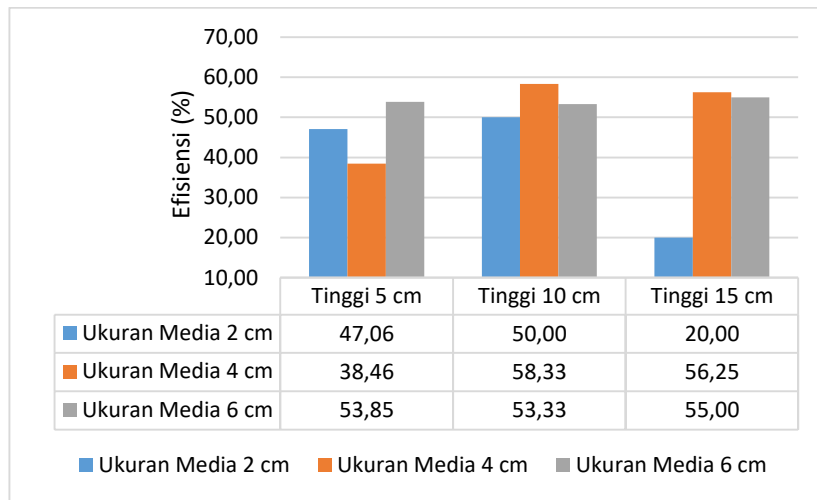
### 4.3 Pengaruh Variabel Ukuran Media Filter

Media filter yang digunakan pada proses penurunan emisi gas yang dihasilkan oleh *incinerator* pada penelitian ini adalah pipa PVC 0,5 inch dengan ukuran media yaitu 2 cm, 4 cm, dan 6 cm. Pemilihan media filter berdasarkan ukuran optimum untuk media filter pada proses penurunan emisi dengan reaktor *wet scrubber* yaitu pipa PVC ukuran 0,5 inch dengan ukuran media filter 2,5 – 5 cm (Sahwan, 2019).

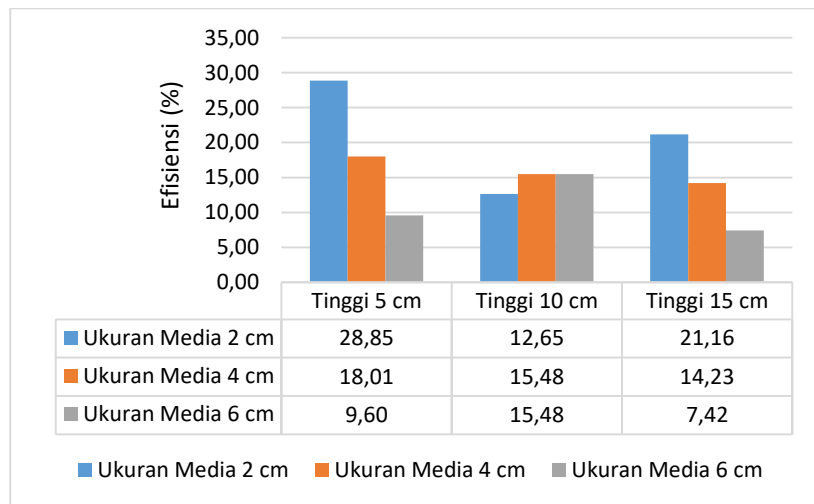
#### 4.3.1 Efisiensi Ukuran Media dengan *No Venturi Vacuum*

Pada Gambar 4.19 merupakan grafik efisiensi NO parameter ukuran media pada reaktor *no venturi vacuum*. Pada gambar dapat dilihat bahwa nilai efisiensi yang paling tinggi yaitu dengan ukuran media 4 cm yaitu sebesar 58,33% dengan tinggi media 10 cm. Pada Gambar 4.20 merupakan grafik efisiensi CO parameter ukuran media pada reaktor *no venturi vacuum*. Pada gambar dapat dilihat bahwa nilai efisiensi yang paling tinggi yaitu pada parameter ukuran media 2 cm yaitu sebesar 28,85% dengan tinggi media 5 cm. Pada Gambar 4.21 merupakan grafik efisiensi SO<sub>2</sub> parameter ukuran media pada reaktor *no venturi vacuum*. Pada gambar dapat dilihat bahwa nilai efisiensi yang paling tinggi yaitu pada parameter ukuran media 2 cm yaitu sebesar 59,32% dengan tinggi media 5 cm.

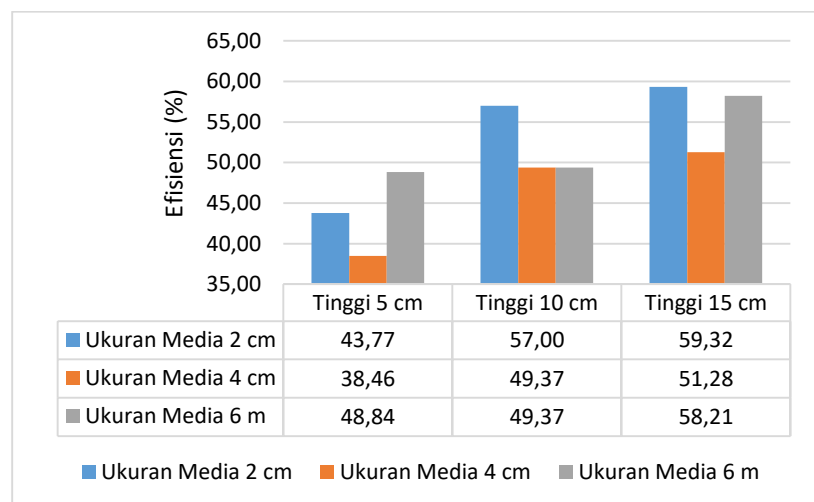
Pada variabel ukuran media dengan reaktor *no venturi vacuum* didapatkan nilai efisiensi tertinggi pada ukuran media filter 2 cm parameter SO<sub>2</sub> dengan tinggi media filter 15 cm yaitu sebesar 59,32%. Hal tersebut disebabkan karena gas SO<sub>2</sub> memiliki tingkat kelarutan yang tinggi dalam air yang merupakan absorben daripada gas NO dan CO (Kaye dan Laby, 1986).



**Gambar 4.19 Efisiensi NO Variabel Ukuran Media No Venturi Vacuum**



**Gambar 4.20 Efisiensi CO Variabel Ukuran Media No Venturi Vacuum**

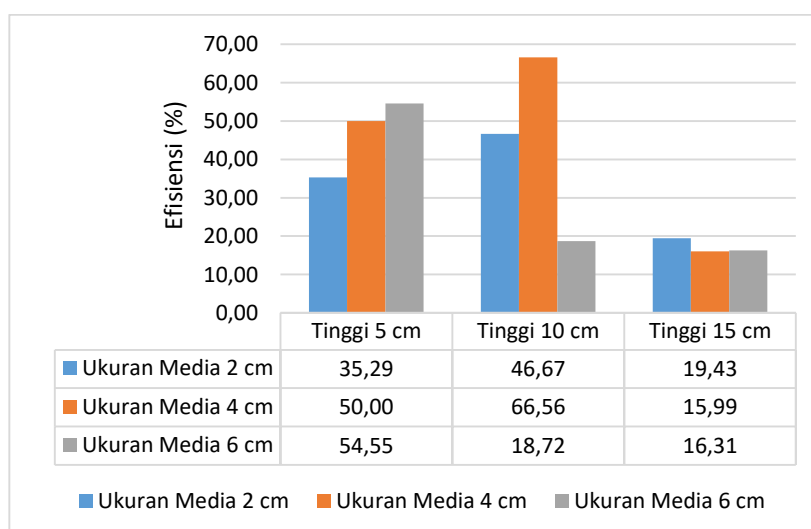


**Gambar 4.21 Efisiensi SO<sub>2</sub> Variabel Ukuran Media No Venturi Vacuum**

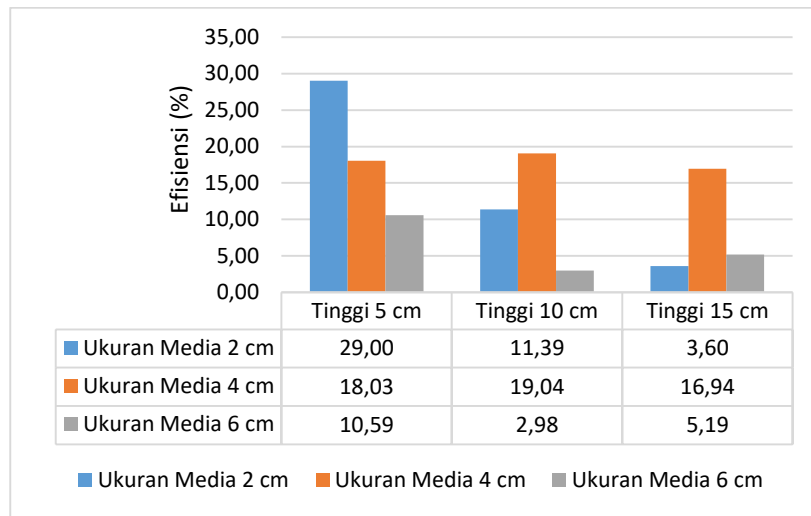
### 4.3.2 Efisiensi Ukuran Media dengan *Single Venturi Vacuum*

Pada Gambar 4.22 merupakan grafik efisiensi NO parameter ukuran media pada reaktor *single venturi vacuum*. Pada gambar dapat dilihat bahwa nilai efisiensi yang paling tinggi yaitu pada parameter ukuran media 4 cm yaitu sebesar 58,33% dengan tinggi media 10 cm. Pada Gambar 4.23 merupakan grafik efisiensi CO parameter ukuran media pada reaktor *single venturi vacuum*. Pada gambar dapat dilihat bahwa nilai efisiensi yang paling tinggi yaitu pada parameter ukuran media 2 cm yaitu sebesar 29% dengan tinggi media 5 cm. Pada Gambar 4.24 merupakan grafik efisiensi SO<sub>2</sub> parameter ukuran media pada reaktor *single venturi vacuum*. Pada gambar dapat dilihat bahwa nilai efisiensi yang paling tinggi yaitu pada parameter ukuran media 2 cm yaitu sebesar 66,42% dengan tinggi media 15 cm.

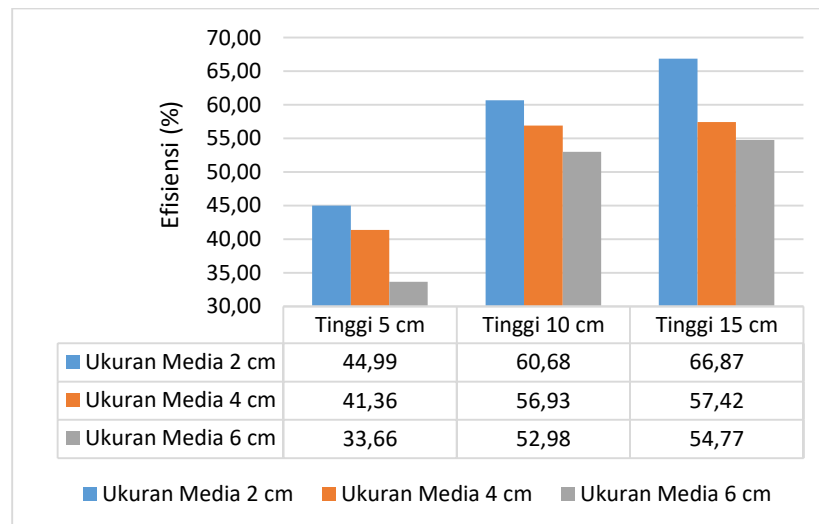
Pada variabel ukuran media dengan reaktor *single venturi vacuum* didapatkan nilai efisiensi tertinggi pada ukuran media 2 cm parameter SO<sub>2</sub> dengan tinggi media filter 15 cm yaitu sebesar 66,87%. Hal tersebut disebabkan karena gas SO<sub>2</sub> memiliki tingkat kelarutan yang tinggi dalam air (absorben) daripada gas NO dan CO (Kaye dan Laby, 1986).



Gambar 4.22 Efisiensi NO Variabel Ukuran Media *Single Venturi Vacuum*



**Gambar 4.23 Efisiensi CO Variabel Ukuran Media *Single Venturi Vacuum***



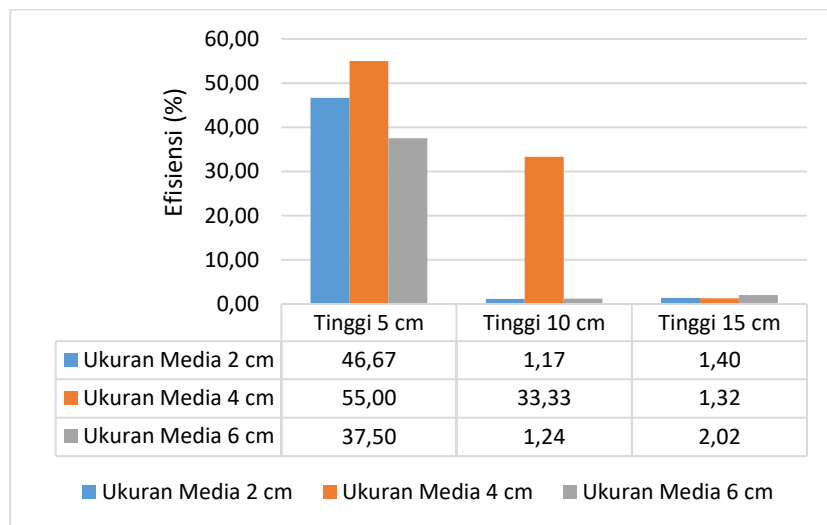
**Gambar 4.24 Efisiensi SO<sub>2</sub> Variabel Ukuran Media *Single Venturi Vacuum***

### 4.3.3 Efisiensi Ukuran Media dengan *Double Venturi Vacuum*

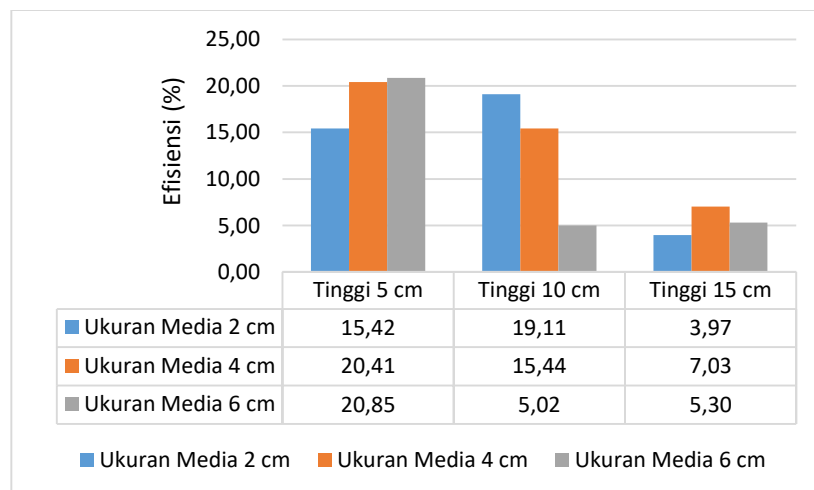
Pada Gambar 4.25 merupakan grafik efisiensi NO parameter ukuran media pada reaktor *double venturi vacuum*. Pada gambar dapat dilihat bahwa nilai efisiensi yang paling tinggi yaitu pada parameter ukuran media 4 cm yaitu sebesar 55% dengan tinggi media 5 cm. Pada Gambar 4.26 merupakan grafik efisiensi CO parameter ukuran media pada reaktor *double venturi vacuum*. Pada gambar dapat dilihat bahwa nilai efisiensi yang paling tinggi yaitu pada parameter ukuran media 6 cm yaitu sebesar 20,85% dengan tinggi media 5 cm. Pada Gambar 4.27 merupakan grafik efisiensi SO<sub>2</sub> parameter ukuran media pada reaktor *double venturi vacuum*. Pada gambar dapat dilihat bahwa nilai

efisiensi yang paling tinggi yaitu pada parameter ukuran media 6 cm yaitu sebesar 65,41% dengan tinggi media 5 cm.

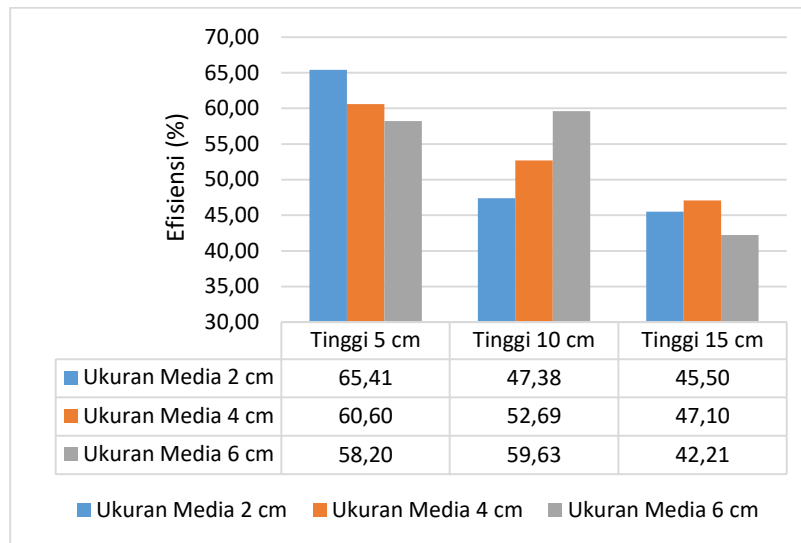
Pada variabel ukuran media dengan reaktor *double venturi vacuum* didapatkan nilai efisiensi tertinggi pada ukuran media 2 cm parameter SO<sub>2</sub> dengan tinggi media filter 5 cm yaitu sebesar 65,41%. Hal tersebut disebabkan karena gas SO<sub>2</sub> memiliki tingkat kelarutan yang tinggi dalam air (absorben) daripada gas NO dan CO (Kaye dan Laby, 1986).



Gambar 4.25 Efisiensi NO Variabel Ukuran Media *Double Venturi Vacuum*



Gambar 4.26 Efisiensi CO Variabel Ukuran Media *Double Venturi Vacuum*



**Gambar 4.27 Efisiensi SO<sub>2</sub> Variabel Ukuran Media *Double Venturi Vacuum***

Pada variabel ukuran media filter dapat disimpulkan ukuran media yang paling efisien dalam menurunkan emisi yaitu dengan menggunakan ukuran media 2 cm. Didapatkan nilai efisiensi tertinggi pada penurunan emisi gas parameter SO<sub>2</sub> dengan menggunakan reaktor *single venturi vacuum* dengan tinggi media 15 cm yaitu sebesar 66,87%. Ketika ukuran media filter yang digunakan semakin besar, maka nilai efisiensi yang dihasilkan akan semakin kecil. Begitupun sebaliknya, semakin kecil ukuran media filter maka nilai efisiensi yang dihasilkan akan semakin besar. Hal ini dikarenakan semakin kecil ukuran media filter akan semakin memperluas total permukaan kontak gas dengan air sehingga proses absorpsi dapat berlangsung lebih optimal.

Didukung oleh penelitian Lestari (2004) bahwa semakin luas permukaan kontak yang terbentuk maka akan sangat mempengaruhi transfer massa dalam sistem. Pernyataan ini diperkuat oleh penelitian Suryaningtyas (2006) yang menyatakan bahwa efisiensi penyisihan gas polutan dipengaruhi oleh ukuran media filter yang digunakan. Semakin besar nilai koefisien luasan area yang terbasahi, maka akan semakin banyak gas polutan yang akan terserap oleh air (absorben). Penelitian menggunakan penyusunan media filter secara acak untuk meningkatkan nilai koefisien luasan area yang terbasahi. Penyusunan media filter secara acak dapat

memberikan luas permukaan yang lebih luas dan dapat mencegah adanya penyumbatan (John C. Mycook dkk, 1995).

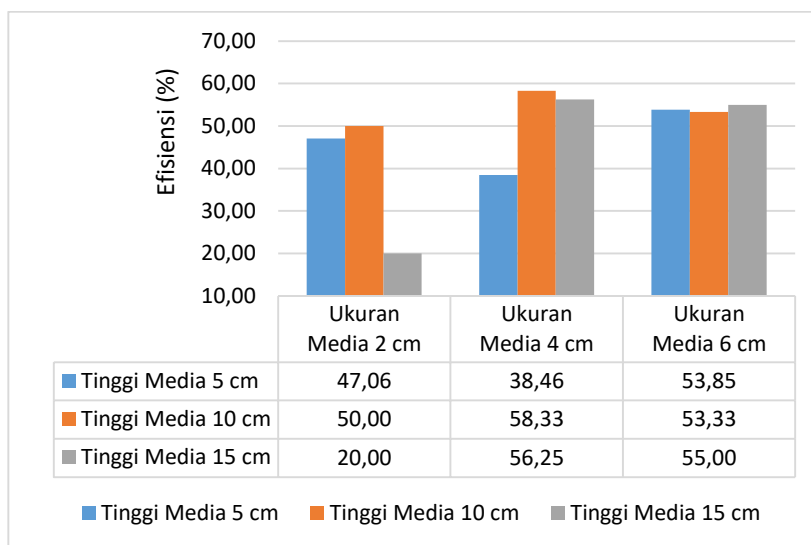
#### **4.4 Pengaruh Variabel Tinggi Media Filter**

Media filter yang digunakan pada proses penurunan emisi gas yang dihasilkan oleh *incinerator* pada penelitian ini adalah pipa PVC 0,5 inch dengan tinggi media yaitu 5 cm, 10 cm, dan 15 cm. Variasi tinggi media filter divariasikan berdasarkan tinggi optimum pada penelitian yaitu 15 – 30 cm (Lee, 2000).

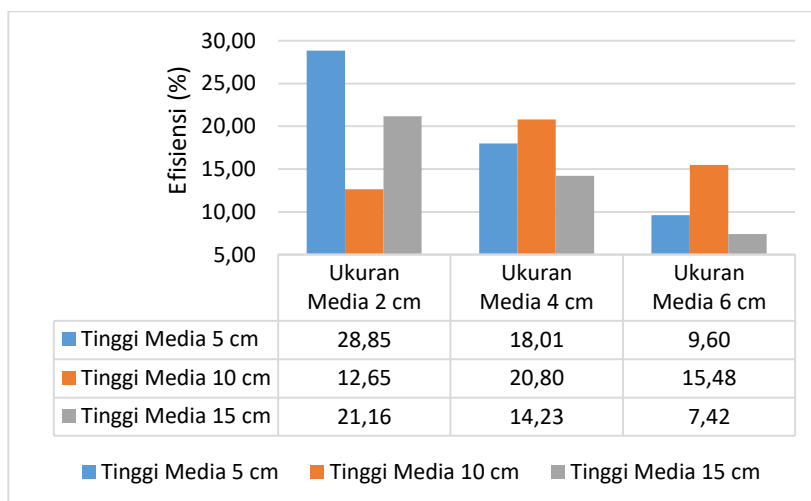
##### **4.4.1 Efisiensi Tinggi Media dengan *No Venturi Vacuum***

Pada Gambar 4.28 merupakan grafik efisiensi NO parameter ukuran media pada reaktor *no venturi vacuum*. Pada gambar dapat dilihat bahwa nilai efisiensi yang paling tinggi yaitu pada parameter ukuran media 4 cm yaitu sebesar 66,67% dengan tinggi media 10 cm. Pada Gambar 4.29 merupakan grafik efisiensi CO parameter ukuran media pada reaktor *no venturi vacuum*. Pada gambar dapat dilihat bahwa nilai efisiensi yang paling tinggi yaitu pada parameter ukuran media 2 cm yaitu sebesar 28,85% dengan tinggi media 5 cm. Pada Gambar 4.30 merupakan grafik efisiensi SO<sub>2</sub> parameter ukuran media pada reaktor *no venturi vacuum*. Pada gambar dapat dilihat bahwa nilai efisiensi yang paling tinggi yaitu pada parameter ukuran media 2 cm yaitu sebesar 59,32% dengan tinggi media 5 cm.

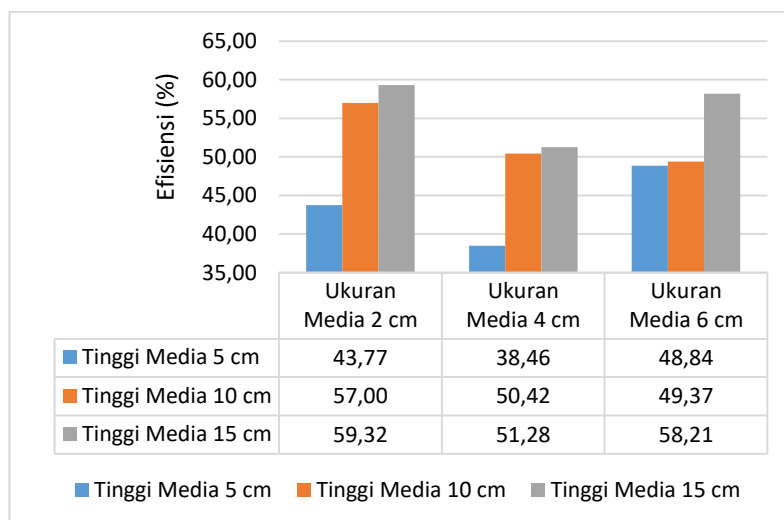
Pada variabel tinggi media dengan reaktor *no venturi vacuum* didapatkan nilai efisiensi tertinggi pada tinggi media 15 cm parameter SO<sub>2</sub> dengan ukuran media filter 2 cm yaitu sebesar 59,32%. Hal tersebut disebabkan karena gas SO<sub>2</sub> memiliki tingkat kelarutan yang tinggi dalam air (absorben) daripada gas NO dan CO (Kaye dan Laby, 1986). Selain itu semakin tinggi media filter, efisiensi reaktor dalam mengabsorpsi emisi gas semakin baik.



**Gambar 4.28 Efisiensi NO Variabel Tinggi Media No Venturi Vacuum**



**Gambar 4.29 Efisiensi CO Variabel Tinggi Media No Venturi Vacuum**



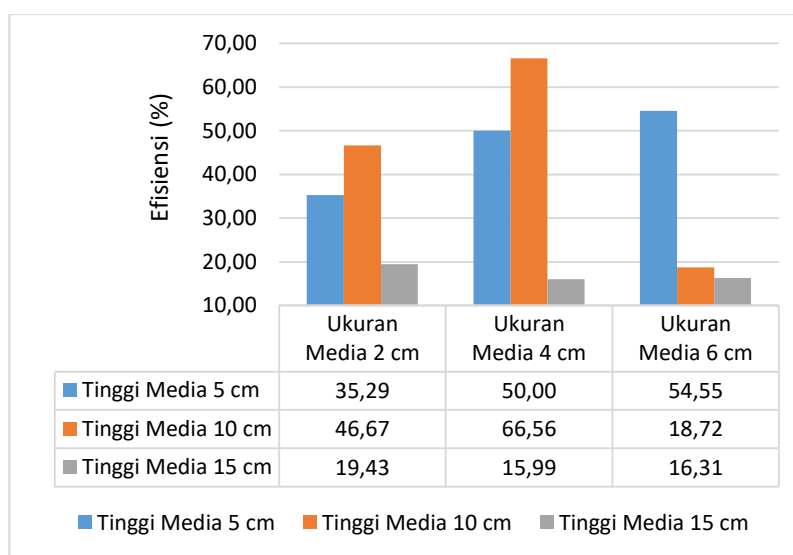
**Gambar 4.30 Efisiensi SO<sub>2</sub> Variabel Tinggi Media No Venturi Vacuum**



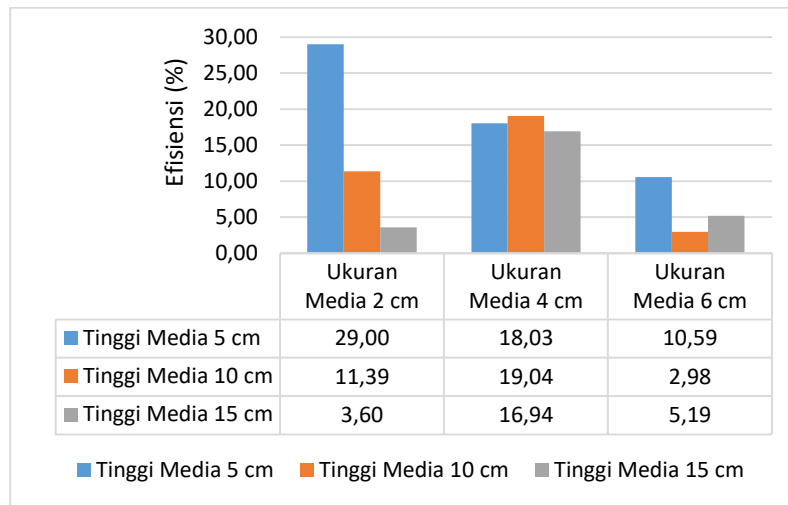
#### 4.4.2 Efisiensi Tinggi Media dengan *Single Venturi Vacuum*

Pada Gambar 4.31 merupakan grafik efisiensi NO parameter ukuran media pada reaktor *single venturi vacuum*. Pada gambar dapat dilihat bahwa nilai efisiensi yang paling tinggi yaitu pada parameter ukuran media 4 cm yaitu sebesar 58,33% dengan tinggi media 10 cm. Pada Gambar 4.32 merupakan grafik efisiensi CO parameter ukuran media pada reaktor *single venturi vacuum*. Pada gambar dapat dilihat bahwa nilai efisiensi yang paling tinggi yaitu pada parameter ukuran media 2 cm yaitu sebesar 29% dengan tinggi media 5 cm. Pada Gambar 4.33 merupakan grafik efisiensi SO<sub>2</sub> parameter ukuran media pada reaktor *single venturi vacuum*. Pada gambar dapat dilihat bahwa nilai efisiensi yang paling tinggi yaitu pada parameter ukuran media 2 cm yaitu sebesar 66,42% dengan tinggi media 5 cm.

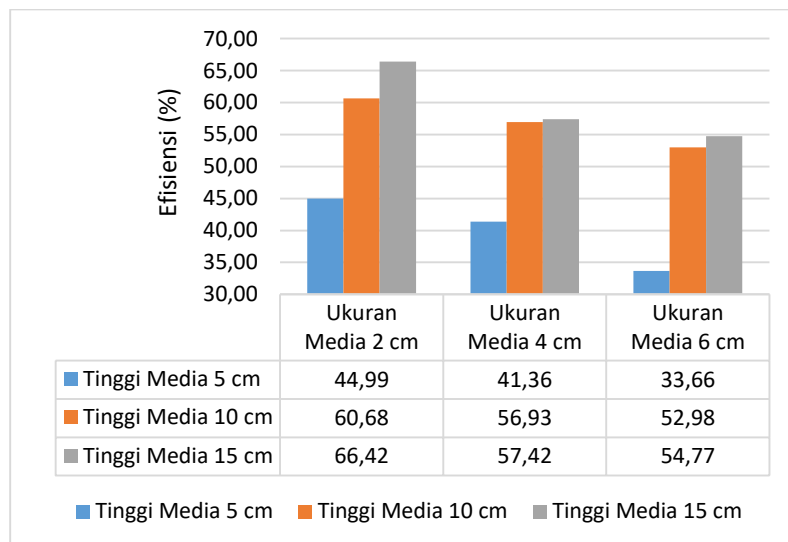
Pada variabel tinggi media dengan reaktor *single venturi vacuum* didapatkan nilai efisiensi tertinggi pada tinggi media 10 cm parameter NO dengan ukuran media filter 4 cm yaitu sebesar 66,56%. Hal tersebut disebabkan karena gas NO memiliki tingkat kelarutan yang cukup tinggi dalam air (absorben) di bawah SO<sub>2</sub> yaitu sebesar 10,19 (Kaye dan Laby, 1986). Sehingga dapat memungkinkan air (absorben) dapat melarutkan gas CO dengan baik seperti SO<sub>2</sub>.



Gambar 4.31 Efisiensi NO Variabel Tinggi Media *Single Venturi Vacuum*



**Gambar 4.32 Efisiensi CO Variabel Tinggi Media *Single Venturi Vacuum***



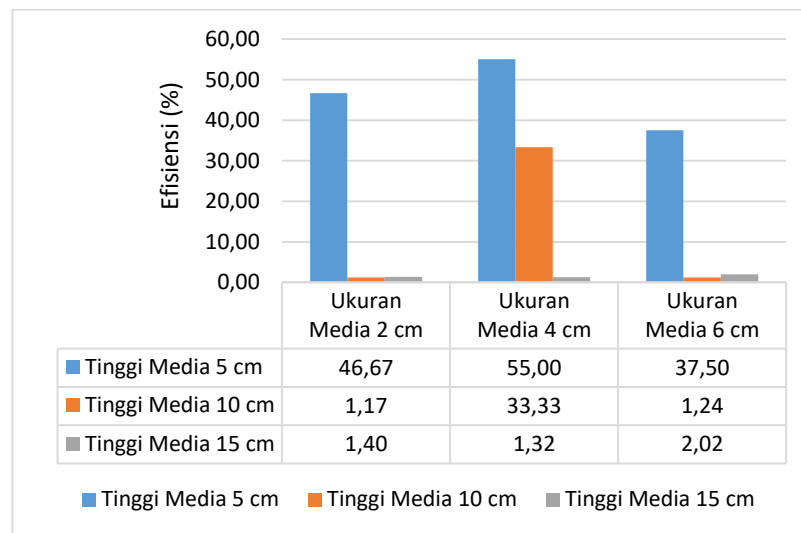
**Gambar 4.33 Efisiensi SO<sub>2</sub> Variabel Tinggi Media *Single Venturi Vacuum***

#### 4.4.3 Efisiensi Tinggi Media dengan *Double Venturi Vacuum*

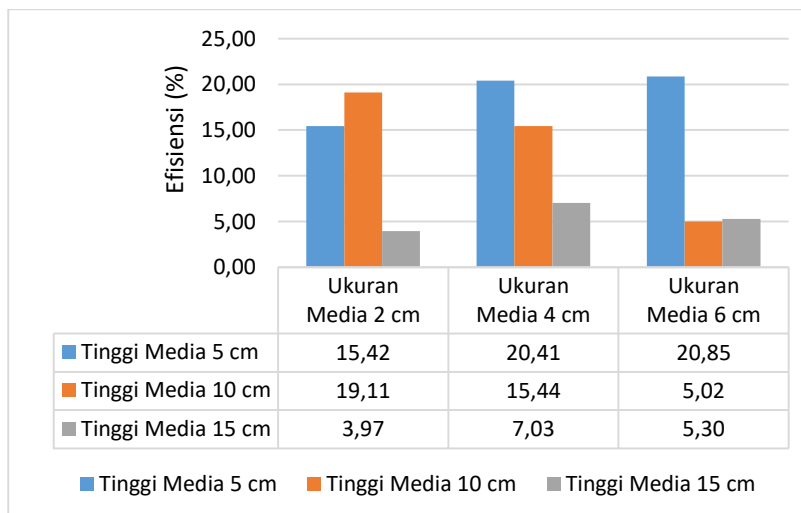
Pada Gambar 4.34 merupakan grafik efisiensi NO parameter ukuran media pada reaktor *double venturi vacuum*. Pada gambar dapat dilihat bahwa nilai efisiensi yang paling tinggi yaitu pada parameter ukuran media 4 cm yaitu sebesar 55% dengan tinggi media 15 cm. Pada Gambar 4.35 merupakan grafik efisiensi CO parameter ukuran media pada reaktor *double venturi vacuum*. Pada gambar dapat dilihat bahwa nilai efisiensi yang paling tinggi yaitu pada parameter ukuran media 6 cm yaitu sebesar 20,85% dengan tinggi media 5 cm. Pada Gambar 4.36 merupakan grafik efisiensi SO<sub>2</sub> parameter ukuran media

pada reaktor *single venturi vacuum*. Pada gambar dapat dilihat bahwa nilai efisiensi yang paling tinggi yaitu pada parameter ukuran media 2 cm yaitu sebesar 65,41% dengan tinggi media 5 cm.

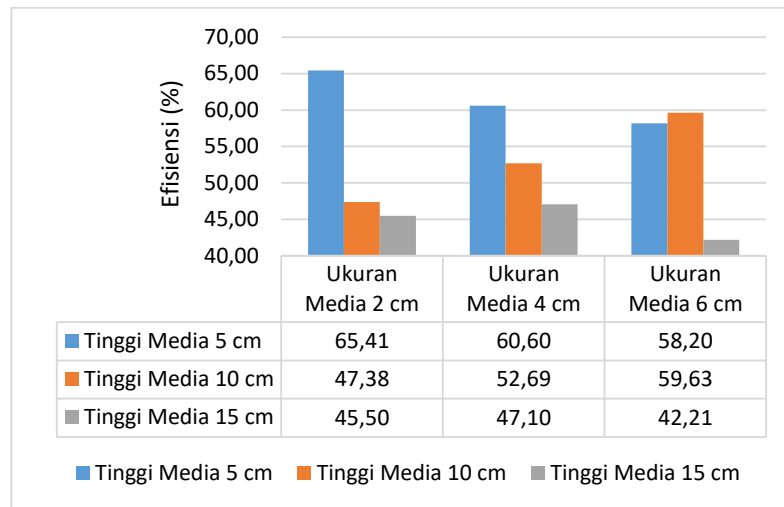
Pada variabel tinggi media dengan reaktor *double venturi vacuum* didapatkan nilai efisiensi tertinggi pada tinggi media 5 cm parameter SO<sub>2</sub> dengan ukuran media filter 2 cm yaitu sebesar 65,41%. Hal tersebut disebabkan karena gas SO<sub>2</sub> memiliki tingkat kelarutan yang tinggi dalam air (absorben) yaitu sebesar 11,28 (Kaye dan Laby, 1986).



**Gambar 4.34 Efisiensi NO Variabel Tinggi Media *Double Venturi Vacuum***



**Gambar 4.35 Efisiensi CO Variabel Tinggi Media *Double Venturi Vacuum***



**Gambar 4.36 Efisiensi SO<sub>2</sub> Variabel Tinggi Media *Double Venturi Vacuum***

Variabel tinggi media filter diperoleh hasil perhitungan nilai efisiensi paling tinggi dengan menggunakan tinggi media filter sebesar 15 cm. Hal ini menunjukkan semakin besar tinggi media filter yang digunakan maka akan memperbesar volume kontak antara gas dengan cairan, dengan demikian total luas permukaan kontak untuk terjadinya proses absorpsi pada reaktor *wet scrubber* akan semakin besar sehingga nilai efisiensi akan semakin tinggi (Suryaningtyas, 2006). Semakin besar tinggi media filter dapat menambah waktu kontak antara gas dengan cairan sehingga dapat meningkatkan efisiensi.

Hasil penelitian pada penurunan emisi gas NO dan CO mempunyai nilai efisiensi berada di bawah gas SO<sub>2</sub> karena kedua gas ini mempunyai nilai kelarutan dalam air lebih rendah yaitu 10,19 untuk NO dan 0,169 untuk CO dibandingkan dengan nilai kelarutan SO<sub>2</sub> yaitu sebesar 11,28 (Kaye and Laby, 1986). Pernyataan ini didukung oleh hasil penelitian Zhang (2011) yang menyatakan bahwa gas SO<sub>2</sub> memiliki nilai kelarutan yang tinggi terhadap air dan gas SO<sub>2</sub> juga dapat dioksidasi dalam tetesan embun. Penurunan gas CO memiliki nilai efisiensi paling rendah dikarenakan gas CO tidak dapat larut dalam air yang digunakan sebagai absorben (Dake, 1985).

#### 4.5 Analisis Statistik Variabel dengan *One-way Anova*

Interaksi hubungan antara variabel penelitian diuji menggunakan uji statistik *One-way Anova*. Pemakaian jenis pengujian ini berdasarkan pada nilai signifikansi tiap variasi. Di dalam uji *One-way Anova*, hubungan setiap variabel akan diuji dengan uji *univariate* yaitu suatu analisis untuk menguji perbedaan data lebih dari dua kelompok. Pengolahan data tersebut diolah dengan menggunakan program *IBM Statistics SPSS 20*. Untuk mengetahui adanya pengaruh antara variabel yang diuji terhadap efisiensi digunakan uji statistik dengan tingkat keyakinan 90%. Apabila nilai hasil uji statistik kurang dari tingkat keyakinan sebesar 90% dengan nilai  $\alpha$  0,1 maka dapat ditarik kesimpulan terhadap hipotesis yang diajukan adalah dapat diterima.

##### 4.5.1 Analisis Efisiensi dengan Jumlah *Venturi*

Untuk mengetahui adanya pengaruh jumlah *venturi* terhadap efisiensi pada proses penurunan emisi gas diperlukan hipotesis penelitian yaitu:

H0 : variasi jumlah *venturi* berpengaruh terhadap efisiensi

H1 : variasi jumlah *venturi* tidak berpengaruh terhadap efisiensi

Hasil pengujian statistik pada variabel jumlah *venturi* terhadap efisiensi NO dapat dilihat pada tabel 4.1. Hasil pengujian statistik bernilai 0,002 yaitu kurang dari  $\alpha$  0,1. Sehingga H0 yang mengatakan variasi jumlah *venturi* berpengaruh terhadap efisiensi dapat diterima.

**Tabel 4.1 Uji Statistik Hubungan Jumlah *Venturi* terhadap Efisiensi NO**  
Efisiensi NO

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	5108.713	2	2554.356	7.921	.002
Within Groups	7739.042	24	322.460		
Total	12847.755	26			

Hasil pengujian statistik pada variabel jumlah *venturi* terhadap efisiensi CO dapat dilihat pada tabel 4.2. Hasil pengujian statistik bernilai 0,432 yaitu lebih dari  $\alpha$  0,1. Sehingga H0 yang mengatakan variasi jumlah *venturi* berpengaruh terhadap efisiensi tidak dapat diterima.

**Tabel 4.2 Uji Statistik Hubungan Jumlah *Venturi* terhadap Efisiensi CO**

Efisiensi CO

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	106.343	2	53.171	.870	.432
Within Groups	1466.696	24	61.112		
Total	1573.038	26			

Hasil pengujian statistik pada variabel jumlah *venturi* terhadap efisiensi SO<sub>2</sub> dapat dilihat pada tabel 4.3. Hasil pengujian statistik bernilai 0,846 yaitu lebih dari  $\alpha$  0,1. Sehingga H<sub>0</sub> yang mengatakan variasi jumlah *venturi* berpengaruh terhadap efisiensi tidak dapat diterima.

**Tabel 4.3 Uji Statistik Hubungan Jumlah *Venturi* terhadap Efisiensi SO<sub>2</sub>**

Efisiensi SO<sub>2</sub>

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	24.015	2	12.007	.169	.846
Within Groups	1706.780	24	71.116		
Total	1730.795	26			

#### 4.5.2 Analisis Efisiensi dengan Ukuran Media

Untuk mengetahui adanya pengaruh ukuran media terhadap efisiensi pada proses penurunan emisi gas diperlukan hipotesis penelitian yaitu:

H<sub>0</sub> : variasi ukuran media berpengaruh terhadap efisiensi

H<sub>1</sub> : variasi ukuran media tidak berpengaruh terhadap efisiensi

Hasil pengujian statistik pada variabel ukuran media terhadap efisiensi NO dapat dilihat pada tabel 4.4. Hasil pengujian statistik bernilai 0,342 yaitu lebih dari  $\alpha$  0,1. Sehingga H<sub>0</sub> yang mengatakan variasi ukuran media berpengaruh terhadap efisiensi tidak dapat diterima.

**Tabel 4.4 Uji Statistik Hubungan Ukuran Media terhadap Efisiensi NO**

Efisiensi NO

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	1099.660	2	549.830	1.123	.342
Within Groups	11748.095	24	489.504		
Total	12847.755	26			

Hasil pengujian statistik pada variabel ukuran media terhadap efisiensi CO dapat dilihat pada tabel 4.5. Hasil pengujian statistik bernilai 0,091 yaitu kurang dari  $\alpha$  0,1. Sehingga H0 yang mengatakan variasi ukuran media berpengaruh terhadap efisiensi dapat diterima.

**Tabel 4.5 Uji Statistik Hubungan Ukuran Media terhadap Efisiensi CO**

Efisiensi CO

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	284.546	2	142.273	2.650	.091
Within Groups	1288.492	24	53.687		
Total	1573.038	26			

Hasil pengujian statistik pada variabel ukuran media terhadap efisiensi SO<sub>2</sub> dapat dilihat pada tabel 4.6. Hasil pengujian statistik bernilai 0,583 yaitu lebih dari  $\alpha$  0,1. Sehingga H0 yang mengatakan variasi ukuran media berpengaruh terhadap efisiensi tidak dapat diterima.

**Tabel 4.6 Uji Statistik Hubungan Ukuran Media terhadap Efisiensi SO<sub>2</sub>**

Efisiensi SO<sub>2</sub>

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	75.992	2	37.996	.551	.583
Within Groups	1654.803	24	68.950		
Total	1730.795	26			

#### 4.5.3 Analisis Efisiensi dengan Tinggi Media

Untuk mengetahui adanya pengaruh tinggi media terhadap efisiensi pada proses penurunan emisi gas diperlukan hipotesis penelitian yaitu:

H0 : variasi tinggi media berpengaruh terhadap efisiensi

H1 : variasi tinggi media tidak berpengaruh terhadap efisiensi

Hasil pengujian statistik pada variabel tinggi media terhadap efisiensi NO dapat dilihat pada tabel 4.7. Hasil pengujian statistik bernilai 0,247 yaitu lebih dari  $\alpha$  0,1. Sehingga H0 yang mengatakan variasi tinggi media berpengaruh terhadap efisiensi tidak dapat diterima.

**Tabel 4.7 Uji Statistik Hubungan Tinggi Media terhadap Efisiensi NO**

Efisiensi NO

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	1413.358	2	706.679	1.483	.247
Within Groups	11434.396	24	476.433		
Total	12847.755	26			

Hasil pengujian statistik pada variabel tinggi media terhadap efisiensi CO dapat dilihat pada tabel 4.8. Hasil pengujian statistik bernilai 0,021 yaitu kurang dari  $\alpha$  0,1. Sehingga H<sub>0</sub> yang mengatakan variasi tinggi media berpengaruh terhadap efisiensi dapat diterima.

**Tabel 4.8 Uji Statistik Hubungan Tinggi Media terhadap Efisiensi CO**

Efisiensi CO

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	434.056	2	217.028	4.573	.021
Within Groups	1138.982	24	47.458		
Total	1573.038	26			

Hasil pengujian statistik pada variabel tinggi media terhadap efisiensi SO<sub>2</sub> dapat dilihat pada tabel 4.9. Hasil pengujian statistik bernilai 0,244 yaitu lebih dari  $\alpha$  0,1. Sehingga H<sub>0</sub> yang mengatakan variasi tinggi media berpengaruh terhadap efisiensi tidak dapat diterima.

**Tabel 4.9 Uji Statistik Hubungan Tinggi Media terhadap Efisiensi SO<sub>2</sub>**

Efisiensi SO<sub>2</sub>

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	192.204	2	96.102	1.499	.244
Within Groups	1538.591	24	64.108		
Total	1730.795	26			

Berdasarkan hasil uji statistik *One-way Anova* terdapat tiga nilai *sig* kurang dari  $\alpha$  0,1 yaitu pada variasi jumlah *venturi* terhadap efisiensi dengan hasil nilai *sig* yang kurang dari  $\alpha$  0,1 pada parameter NO sebesar 0,002 sedangkan pada variasi ukuran media filter dan tinggi media filter hasil nilai *sig* yang kurang dari  $\alpha$  0,1 didapatkan pada parameter CO sebesar 0,091 dan 0,021. Nilai *sig* yang kurang



dari  $\alpha$  0,1 menunjukkan bahwa variasi berpengaruh terhadap efisiensi. Rangkuman nilai hasil dari uji statistik dengan menggunakan *One-way Anova* dapat dilihat pada tabel 4.10.

Terjadinya pengaruh antara reaktor *wet scrubber* terhadap efisiensi tersebut dikarenakan nilai efisiensi mengalami peningkatan pada ketiga variasi reaktor tersebut. Nilai efisiensi paling tinggi terjadi pada variasi reaktor *single venturi vacuum* yaitu sebesar 66,87% untuk penurunan emisi SO<sub>2</sub>.

**Tabel 4.10 Hasil Uji Statistik *One-way Anova* terhadap Efisiensi**

Variabel	Parameter	Nilai sig
Jumlah <i>venturi</i>	NO	0,002
	CO	0,432
	SO <sub>2</sub>	0,846
Ukuran media	NO	0,342
	CO	0,091
	SO <sub>2</sub>	0,583
Tinggi media	NO	0,242
	CO	0,021
	SO <sub>2</sub>	0,244

#### 4.6 Efisiensi Reaktor *Wet Scrubber* pada Proses Penurunan Emisi

Hasil uji penelitian dibandingkan dengan baku mutu yang berlaku yaitu Peraturan Pemerintah Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor P.70/Menlhk/Setjen/Kum.1/8/2016 mengenai baku mutu emisi usaha atau kegiatan pengolahan sampah secara termal menunjukkan bahwa reaktor *wet scrubber* masih belum optimum secara keseluruhan. Meskipun reaktor mampu menurunkan emisi SO<sub>2</sub> dan CO hingga di bawah baku mutu yang ditetapkan namun reaktor belum mampu menurunkan NO hingga di bawah baku mutu yang ditetapkan. Hal tersebut dikarenakan NO pada temperatur tinggi tidak mudah larut dalam air, tetapi akan mudah larut pada absorben air kapur (CaCO<sub>3</sub>) (Ain, 2019).

Hal tersebut menunjukkan efisiensi reaktor dalam penurunan emisi gas masih kurang stabil. Ditinjau dari nilai efisiensi menunjukkan bahwa reaktor dengan *no venturi vacuum*, *single venturi vacuum*, maupun *double venturi vacuum* masih belum optimum. Dimana secara teori penurunan emisi gas menggunakan teknologi *wet scrubber* harus dapat memberikan minimal efisiensi sebesar 70% (EPA, 1995). Sedangkan dalam penelitian yang dilakukan efisiensi tertinggi yang didapatkan adalah sebesar 66,87%. Efisiensi tersebut didapatkan pada parameter SO<sub>2</sub> dengan menggunakan reaktor *single venturi* dengan variasi ukuran media filter 2 cm, dan tinggi media filter 15 cm. Perbandingan nilai *outlet* pada reaktor *wet scrubber* dengan baku mutu yang berlaku dapat dilihat pada Tabel 4.11.

**Tabel 4.11 Perbandingan Nilai Outlet dengan Baku Mutu**

No.	Parameter	Satuan	Batas Maksimum	Outlet rata-rata no venturi	Outlet rata-rata single venturi	Outlet rata-rata double venturi
1.	Sulfur Dioksida (SO <sub>2</sub> )	ppm	87	1	1	1
2.	Oksida Nitrogen (NO <sub>x</sub> )	ppm	79,9	1428	1497	1393
3.	Karbon Monoksida (CO)	ppm	223,9	206	223	219

Dilihat dari hasil tersebut menunjukkan bahwa kinerja dari reaktor terhadap efisiensi belum mencapai optimum. Sehingga performa reaktor perlu ditingkatkan agar menghasilkan kondisi optimum dalam penurunan emisi gas sesuai dengan baku mutu yang ditetapkan. Peningkatan performa reaktor *wet scrubber* dapat dilakukan dengan beberapa perbaikan-perbaikan seperti berikut:

#### 1. Laju Aliran Gas

Laju aliran gas merupakan salah satu parameter yang penting pada proses absorpsi yang terjadi dalam *wet scrubber*. Semakin tinggi laju aliran gas, maka semakin besar sistem dan volume *scrubbing liquid* yang dibutuhkan untuk menurunkan emisi gas. *Wet scrubber* beroperasi pada laju aliran gas yang kecil meskipun reaktor telah didesain untuk kondisi

laju aliran gas yang masuk kecil yaitu 1 – 2 m/s (Lee, 2000) dan dapat diatur dengan *valve* yang ada pada pipa reaktor, namun kondisi ruang bakar yang membutuhkan penambahan udara dengan bantuan alat *blower* menyebabkan laju aliran gas yang masuk pada *wet scrubber* menjadi lebih besar yaitu sebesar 3 m/s.

## 2. Nilai Rasio Cairan-Gas (L/G)

Rasio L/G adalah perbandingan antara volume cairan yang diinjeksikan ke *wet scrubber* dengan volume gas yang mengalir di dalam *wet scrubber*. L/G rasio maksimum tiap tipe *scrubber* beraneka ragam, sehingga komponen ini dapat digunakan untuk pemilihan tipe *wet scrubber* yang harus dipasang pada instalasi yang diigunakan dengan perhitungan perbandingan yang tepat (Khairumizan, 2008).

## 3. Kecepatan dan Tekanan Aliran Gas

Kecepatan dan tekanan fluida dengan meningkatkan kecepatan antara aliran gas dan tetesan cairan (*droplet*) dapat mengakibatkan pertambahan kecepatan terhadap gerakan partikel di dalam *wet scrubber*. Beberapa cara dapat dilakukan untuk mempengaruhi kecepatan aliran di antaranya yaitu dengan memperkecil dimensi penampang aliran atau menginjeksikan fluida secara berlawanan arah atau disebut dengan *counter-current* (Budiman, 2018).

## 4. Jumlah dan Ukuran Partikel yang Didistribusikan

Jumlah dan ukuran partikel atau gas yang didistribusikan pada gas 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).

## 5. Ukuran Butir (*droplet*)

Ukuran butir (*droplet*) yang lebih kecil akan memperbesar laju absorpsi karena adanya kenaikan luas permukaan kontak. *Droplet* yang lebih kecil memiliki permukaan yang lebih besar terhadap rasio volume, maka akan menangkap emisi gas yang lebih banyak per volume untuk diinjeksikan (Pilat, 2004).

**“Halaman ini sengaja dikosongkan”**

## BAB 5

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil berdasarkan dari hasil penelitian yang telah dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Nilai efisiensi tertinggi parameter NO sebesar 66,67%, CO sebesar 29,69%, dan SO<sub>2</sub> sebesar 66,87%. Dari ketiga parameter yang diuji yang mempunyai nilai efisiensi paling tinggi adalah parameter SO<sub>2</sub>. Hal itu disebabkan SO<sub>2</sub> mempunyai nilai kelarutan yang paling tinggi dalam air dibandingkan nilai kelarutan NO dan CO.
2. Dibandingkan dengan reaktor dengan *no venturi* penambahan *single venturi* meningkatkan efisiensi removal semua parameter (NO, CO, SO<sub>2</sub>). Namun pada penambahan *double venturi* tidak dapat meningkatkan efisiensi dikarenakan kurangnya tekanan *water pump* dalam mengalirkan air sehingga kontak antara gas dengan air tidak dapat maksimal.
3. Semakin kecil ukuran media filter dan semakin tinggi media filter pada sistem *three-stage filter wet scrubber* akan meningkatkan nilai efisiensi removal emisi gas. Hal ini disebabkan dengan kecilnya ukuran media filter dan tingginya media filter dapat memperbesar luas permukaan kontak antara gas dengan air.

#### 5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan pada penelitian yang telah dilakukan adalah perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk meningkatkan efisiensi penurunan emisi gas *incinerator* pada sistem *wet scrubber* dengan penambahan variasi lain seperti laju aliran gas, nilai rasio L/G, kecepatan dan tekanan aliran gas, jumlah dan ukuran partikel yang didistribusikan, dan ukuran butir (*droplet*).

**“Halaman ini sengaja dikosongkan”**

## DAFTAR PUSTAKA

- Aboudheir, D. deMontigny, P. Tontiwach wuthikul, A. Chakma. 1998. *Important Factors Affecting Carbon Dioxide Removal Efficiency By Using Extra high Concentrated Monoethanolamine Solutions and High-Capacity Packings*. Process Systems Laboratory. Faculty of Engineering. University of Regina, Regina, Saskatchewan, Canada S4S 0A2, Society of Petroleum Engineers, Inc
- Agus Gindo S., Budi Hari H. 2007. *Pengukuran Partikel Udara Ambien (TSP, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub>) di Sekitar Calon Lokasi PLTN Semenanjung Lemahabang*. Pusat Teknologi Limbah Radioaktif-BATAN
- Al-Hussari, RR.R., AL-Fatlawy, A.D., and Al-Aqad, M.H. 2015. *Simulation of the Solubility of SO<sub>2</sub> on Water Using CFD Modeling Airlift Reactor*. American Journal of Chemical Engineering. 3 (1):19-24
- Azhar dan Herti Utami. 2017. *Transfer Massa dan Panas*. Bandar Lampung: Teknik Kimia Publishing
- Ain, L. Q. 2019. *Penurunan Kandungan Emisi Insinerator Sampah Plastik Non-reusable Menggunakan Two Stage Packing Scrubber*. Surabaya: Tesis Jurusan Teknik Lingkungan FTSP ITS
- Anuar Sharuddin, S. D. et al., 2017. *Energy Recovery from Pyrolysis of Plastic Waste: Study on non-recycled plastic (NRP) data as the real measure of plastic waste, Energy Conversion and Management*. Elsevier Ltd, 148, pp. 925-934
- Badan Pengendalian Dampak Lingkungan. KEP-03/BAPEDAL/09/1995. *Tentang Persyaratan Teknis Pengolahan Limbah Bahan Berbahaya Dan Beracun*
- Bartocci, Andrew C. 2011. *High Efficiency SO<sub>2</sub> Scrubber Design to Reduce Caustic Consumption*. Envitech
- Brown, GG. 1950. *Unit Operation*. John Willey and Sons Inc. New York
- Budiman, Arif. 2001. *Modifikasi Desain dan Uji untuk Kerja Alat Pembakar sampah (Incinerator) Tipe Batch*. Bogor: Institut Pertanian Bogor
- Budiman, W.N.R.A. 2018. *Perencanaan Emisi PM 10 Pada Industri Peleburan Baja Cilegon-Banten*. Tugas Akhir Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

- Charles, E and Baukal J,R. 2004. *Industrial Combustion Pollution and Control*. Marcel Dekker. New York
- Cheremisinoff, N, Paul. 1993. *Air Pollution Control And Design For Industry*. New York: Marcell Dekker
- Dake, Jonas M.K. 1985. *Hidrolika Teknik (terjemahan)*. Erlangga. Jakarta
- Ebenezer. 2006. *Pengaruh Bahan Bakar Transportasi terhadap Pencemaran Udara dan Solusinya*. Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada
- Environmental Protection Agency. 1995. *Wet Scrubber for Acid Gas, Research Triangle Park. EPA/452/B-02-001*
- Eriksson, O., Finnveden, G. 2009. *Plastic Waste As A Fuel - CO<sub>2</sub>-Neutral Or Not?*. Energy & Environmental Science Journal, 2:907–914
- Fardiaz, S. 1992. *Mikrobiologi Pangan*. Jakarta: Gramedia Pustaka Utama
- Giles, Ranald V. 1984. *Mekanika Fluida dan Hidraulika*. Second edition. Jakarta: Erlangga
- Haris, A. 2011. *Penurunan Debu Padi Menggunakan Wet Scrubber*. Tesis Institut Teknologi Sepuluh Nopember
- Haryanto, Budi. 2008. *Pengaruh Pemilihan Kondisi Batas, Langkah Ruang, Langkah Waktu, dan Koefisien Difusi pada Model*. Jurnal APLIKA, 4 (1): 2
- Hillestad, Magne, Hanne M. Kvamsdal, Nina Enaasen, Actor Chikukwa. 2012. *Dynamic Modeling of Post-combustion CO<sub>2</sub> Capture Using Amines - A Review*. Norway: Norwegian University of Science and Technology
- Jafari, M.J., Babaei, M.H., Yazdanbakhsh, A.R., Mehrabi, Y., Ghasemi, R., and Kazempour, M. 2012. *The Role of Packing Media in a Scrubber Performance Removing Sulfuric Acid Mists*. International Journal Of Occupational Hygiene, 4:26-31
- Jáuregui-Haza, U.J., Pardillo-Fontdevila, E.J., Wilhelm, A.M., and Delmas, H. 2004. *Solubility Of Hydrogen And Carbon Monoxide In Water And Some Organic Solvents*. Latin American Applied Research, 34:71-74
- 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. and 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.* Depok: Universitas Indonesia
- Khoerunnisa, Fitri. 2008. *Kimia Fisika 2.* Jakarta: Universitas Terbuka
- Koswara, Sutrisno. 2006. *Kajian Pemanfaatan Sampah Plastik sebagai Sumber Bahan Bakar Cair.* Jakarta: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin FT UI
- Koto, Indra. 2016. *Karakterisasi Pressure Drops Pada Aliran Bubble dan Slug Air – Udara Searah Vertikal Ke Atas Melewati Sudden Contraction.* Medan: Universitas Negeri Medan
- Lee, CC. 2000. *Handbook of Environmental Engineering Calculation.* McGraw-Hill, New York
- 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*
- Loo, S.V. and Koppejan, J. 2008. *The Handbook Of Biomass Combustion & Co Firing,* EARTHSCAN. London. English
- McCabe, W.L., Smith, J.C., Harriott, P., 1993. *Unit Operations of Chemical Engineering 5th Edition.* New York: McGraw-Hill Book Co
- Mugo, Nyoti Stephen G., Nyaanga, D.M., Owido, Muniu J.M., 2017. *Performance of Small-Scale Waste Incinerators and Emission Levels-Case Study of Egerton University and its Environs, Kenya.* International Journal of Engineering Research and Technology (IJERT), Vol. 6, Issue 03
- Merchuk J.C. dan S. Ben-Zvi (Yona). 1992. *A Novel Approach to The Correlation of Mass Transfer Rates in Bubble Column with Non-Newtonian Liquids.* Chem. Eng. Sci. hal 3517-3523. Pergamon Press Ltd
- Mycook, J.C, McKenna, J.D. Theodore, Louis,. 1995. *Air Pollution Control Engineering.* New York: 5th Edition. McGraw-Hill Book Co
- 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

- Pilat, M.J. and Lucas, J.C. 2004. *Droplet charging for wet scrubber*. Journal of the Air & Waste Management Association, 54:3-7
- Pillai, K.C., Chung, S.J., Raju, T., Moon, I.S. 2009. *Experimental Aspect Of Combined NO<sub>x</sub> and SO<sub>2</sub> Removal From Flue-Gas Mixture In An Integrated Wet scrubber-Electrochemical Cell System*. Chemosphere Journal, 76:657-664
- Putra, Angga Purnama. 2010. *Pengaruh Variasi Laju Aliran Air pada Venturi Scrubber terhadap Reduksi Tar dan Bentuk Flame pada Sistem Gasifikasi Biomassa*. Depok: FT UI
- Rizal, A.M., Nurhayati, I. 2017. *Pengolahan Limbah Bahan Berbahaya Dan Beracun (B3) Dengan Insinerator Tipe Reciprocating Grate Insinerator*. Jurnal Teknik Waktu, 15(2):21-27. ISSN:1412-1867
- Sahwan, Firman. 2019. *Purifikasi Gas Metana (CH<sub>4</sub>) dari TPA Sampah Menggunakan Metode Wet Scrubber*. Banten: Badan Pengkajiann dan Penerapan Teknologi
- Suprpto dan Susilo Widodo. 2017. *Pengenalan Teknologi Vakum*. Yogyakarta: Pustaka Pelajar
- Surono, U.B. 2013. *Berbagai Metode Konversi Sampah Plastik Menjadi Bahan Bakar Minyak*. Jurnal Teknik, Vol.3,No.1
- Suryaningtyas, N. 2006. *Studi Untuk Kerja Wet scrubber Untuk Penyisihan Gas SO<sub>x</sub> dan Pengaruhnya terhadap Nilai pH Absorbent*. Tugas Akhir Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Surabaya
- Takwim, Akhsanu R,N., dan Kris Witono. 2018. *Analisis Unjuk Kerja Venturi Vakum dengan Variasi Dimensi dan Viskositas Fluida*. Malang: Politeknik Negeri Malang
- Terraglio, Frank, P., Raymond, M. and Manganelli, M. 2012. *The Absorption of Atmospheric Sulfur Dioxide by Water Solutions*. Journal of the Air Pollution, 17(6):403-406
- Treybal, R. E., 1980. *Mass Transfer Operation*. Third Edition. p.275. New York: Mc Graw Hill Book Co
- Trihadiningrum, Y. 2016. *Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya Dan Beracun (B3)*. Teknosain. Yogyakarta

Undang-undang Republik Indonesia Nomor 18 Tahun 2008 tentang Pengelolaan Sampah. Jakarta: Sekretariat Negara.

Wardana, ING. 2008. *Bahan Bakar dan teknologi Pembakaran*. Malang: PT Danar Wijaya Brawijaya University Press

Zhang, Q., Tie, X. 2011. *High solubility of SO<sub>2</sub>: evidence in an intensive fog event measured in the NCP region, China*. Atmospheric Chemistry and Physics Discussions. 11:2931–2947

Zumdahl, S. S. 2010. *Chemistry. Eighth edition*. United States of America: Cengage Learning

## LAMPIRAN 1

### A. Hasil Pengukuran Emisi *input* dan *output* pada reaktor *no venturi vacuum*

Tinggi (cm)	Ukuran (cm)	Waktu (menit)	NO (ppm)		Selisih ppm	CO (ppm)		Selisih ppm	SO <sub>2</sub> (ppm)		Selisih ppm
			<i>inlet</i>	<i>outlet</i>		<i>inlet</i>	<i>outlet</i>		<i>inlet</i>	<i>outlet</i>	
5	2	1	0	0	0	1533	1144	389	713	484	229
		2	1	1	0	1542	1158	384	546	274	272
		3	1	0	1	1623	1172	451	619	396	223
		4	2	1	1	1842	1167	675	876	465	411
		5	3	1	2	2089	1237	852	532	268	264
		6	1	0	1	1743	1242	501	648	553	95
		7	3	2	1	1685	1153	532	427	235	192
		8	1	1	0	1572	1182	390	402	348	54
		9	4	3	1	1456	1173	283	239	218	21
		10	1	0	1	1432	1124	308	161	107	54
	x□		1,7	0,9	0,8	1651,7	1175,2	476,5	425,55	239,3	186,25
	4	1	1	0	1	1983	1802	181	595	227	368
		2	3	2	1	2362	2163	199	673	232	441
		3	2	1	1	2685	1746	939	584	185	399
		4	1	1	0	1845	1632	213	702	209	493
		5	1	1	0	2138	1846	292	615	248	367
		6	1	1	0	2363	1735	628	579	167	412
		7	0	0	0	1833	1543	290	436	312	124
		8	2	1	1	1672	1435	237	374	263	111
		9	1	1	0	1648	1326	322	289	204	85
		10	1	0	1	1486	1183	303	176	116	60
	x□		1,3	0,8	0,5	2001,5	1641,1	360,4	359,3	221,1	138,2
	6	1	0	0	0	1923	1821	102	639	515	124
		2	1	0	1	1842	1774	68	713	635	78
		3	2	1	1	2596	2463	133	537	234	303
		4	1	1	0	2472	1968	504	636	245	391
		5	3	1	2	2389	1846	543	565	176	389
		6	1	1	0	2015	1923	92	758	187	571
		7	0	0	0	1708	1678	30	463	194	269
		8	0	0	0	1643	1581	62	335	149	186
9		3	1	2	1489	1312	177	217	166	51	
10		2	1	1	1208	1068	140	209	156	53	
x□		1,3	0,6	0,7	1928,5	1743,4	185,1	386,45	197,7	188,75	
10	2	1	0	0	0	1327	1182	145	561	314	247
		2	1	0	1	1495	1257	238	456	221	235
		3	1	0	1	1432	1386	46	587	183	404

Tinggi (cm)	Ukuran (cm)	Waktu (menit)	NO (ppm)		Selisih ppm	CO (ppm)		Selisih ppm	SO <sub>2</sub> (ppm)		Selisih ppm	
			inlet	outlet		inlet	outlet		inlet	outlet		
		4	2	1	1	1558	1297	261	608	205	403	
		5	1	1	0	1672	1325	347	677	235	442	
		6	0	0	0	1563	1320	243	568	182	386	
		7	2	1	1	1357	1218	139	451	207	244	
		8	5	3	2	1421	1282	139	367	187	180	
		9	1	1	0	1315	1167	148	236	175	61	
		10	1	0	1	1236	1123	113	228	129	99	
		x□		1,4	0,7	0,7	1437,6	1255,7	181,9	473,9	203,8	270,1
		4	1	0	0	0	1252	1142	110	578	185	393
			2	1	0	1	1326	1167	159	646	217	429
	3		2	1	1	1389	1025	364	535	367	168	
	4		0	0	0	1389	1052	337	427	293	134	
	5		1	1	0	1422	1176	246	574	242	332	
	6		3	1	2	1673	1169	504	686	253	433	
	7		3	1	2	1564	1015	549	532	268	264	
	8		1	0	1	1438	1126	312	383	227	156	
	9		1	0	1	1263	1109	154	269	193	76	
	10		0	0	0	1126	982	144	156	128	28	
	x□		1,2	0,4	0,8	1384,2	1096,3	287,9	478,6	237,3	241,3	
	6	1	1	0	1	1489	1261	228	563	279	284	
		2	1	0	1	1683	1322	361	682	393	289	
		3	3	1	2	1482	1338	144	751	389	362	
		4	2	1	1	1775	1316	459	736	341	395	
		5	3	2	1	1471	1398	73	742	276	466	
		6	2	1	1	1498	1415	83	576	258	318	
		7	1	1	0	1517	1395	122	512	263	249	
		8	1	0	1	1523	1112	411	386	216	170	
		9	0	0	0	1458	1206	252	275	182	93	
		10	1	1	0	1416	1178	238	213	155	58	
	x□		1,5	0,7	0,8	1531,2	1294,1	237,1	543,6	275,2	268,4	
	15	2	1	1	1	0	1704	1139	565	622	251	371
			2	1	0	1	1527	1283	244	438	182	256
			3	3	2	1	1656	1164	492	576	155	421
4			2	1	1	1873	1288	585	438	273	165	
5			1	0	1	1892	1493	399	863	383	480	
6			1	1	0	1863	1695	168	663	276	387	
7			0	0	0	1834	1663	171	641	185	456	
8			1	1	0	1827	1482	345	742	237	505	
9			1	0	1	1813	1342	471	528	332	196	
10			3	1	2	1410	1168	242	372	119	253	

Tinggi (cm)	Ukuran (cm)	Waktu (menit)	NO (ppm)		Selisih ppm	CO (ppm)		Selisih ppm	SO <sub>2</sub> (ppm)		Selisih ppm
			<i>inlet</i>	<i>outlet</i>		<i>inlet</i>	<i>outlet</i>		<i>inlet</i>	<i>outlet</i>	
	x <sup>□</sup>		1,4	0,7	0,7	1739,9	1371,7	368,2	588,3	239,3	349
	4	1	0	0	0	1748	1675	73	675	277	398
		2	1	0	1	1636	1706	-70	556	248	308
		3	1	1	0	1892	1693	199	428	293	135
		4	1	0	1	2197	1798	399	756	385	371
		5	3	1	2	2483	1629	854	416	273	143
		6	5	3	2	1963	1739	224	537	166	371
		7	1	1	0	1912	1628	284	379	158	221
		8	1	0	1	1802	1512	290	329	184	145
		9	2	1	1	1917	1598	319	283	125	158
		10	1	0	1	1634	1477	157	179	102	77
	$\bar{x}$		1,6	0,7	0,9	1918,4	1645,5	272,9	453,8	221,1	232,7
	6	1	1	0	1	1743	1603	140	395	186	209
		2	1	0	1	1723	1656	67	672	123	549
		3	2	1	1	1885	1627	258	581	367	214
		4	3	1	2	1839	1689	150	665	362	303
		5	2	1	1	1813	1726	87	782	183	599
		6	5	3	2	1738	1688	50	459	261	198
		7	3	1	2	1803	1798	5	362	135	227
		8	2	1	1	1738	1696	42	383	127	256
		9	1	1	0	1681	1525	156	226	116	110
		10	0	0	0	1676	1322	354	206	117	89
	$\bar{x}$		2	0,9	1,1	1763,9	1633	130,9	473,1	197,7	275,4

**B. Hasil Pengukuran Emisi *input* dan *output* pada reaktor *single venturi vacuum***

Tinggi (cm)	Ukuran (cm)	Waktu (menit)	NO (ppm)		Selisih ppm	CO (ppm)		Selisih ppm	SO <sub>2</sub> (ppm)		Selisih ppm	
			<i>inlet</i>	<i>outlet</i>		<i>inlet</i>	<i>outlet</i>		<i>inlet</i>	<i>outlet</i>		
5	2	1	0	0	0	1513	1124	389	671	284	387	
		2	1	0	1	1642	1139	503	546	274	272	
		3	1	1	0	1686	1178	508	719	296	423	
		4	2	1	1	1732	1225	507	876	265	611	
		5	3	1	2	2253	1237	1016	532	268	264	
		6	1	1	0	1791	1213	578	648	253	395	
		7	3	2	1	1684	1198	486	427	235	192	
		8	1	1	0	1572	1187	385	302	248	54	
		9	4	3	1	1491	1176	315	239	219	20	
		10	1	1	0	1435	1134	301	161	107	54	
	x <sup>□</sup>			1,7	1,1	0,6	1679,9	1181,1	498,8	378,5	208,2	170,3
	4	1	1	1	0	1993	1808	185	495	224	271	
		2	3	2	1	2378	2167	211	673	232	441	
		3	3	1	2	2689	1789	900	584	185	399	
		4	1	1	0	1841	1636	205	702	209	493	
		5	1	1	0	2234	1843	391	615	248	367	
		6	1	0	1	2363	1735	628	524	167	357	
		7	0	0	0	1831	1548	283	456	282	174	
		8	2	0	2	1678	1432	246	312	263	49	
		9	1	1	0	1688	1321	367	289	224	65	
		10	1	0	1	1486	1263	223	176	118	58	
	x <sup>□</sup>			1,4	0,7	0,7	2018,1	1654,2	363,9	348,9	204,6	144,3
	6	1	0	0	0	2213	1838	375	661	215	446	
		2	1	0	1	1842	1774	68	773	235	538	
		3	2	1	1	2598	2464	134	531	237	294	
		4	1	1	0	2472	1968	504	636	245	391	
		5	1	1	0	2389	1846	543	565	176	389	
		6	1	1	0	2017	1963	54	758	187	571	
		7	0	0	0	1708	1678	30	443	194	249	
		8	0	0	0	1643	1581	62	335	145	190	
9		3	0	3	1489	1302	187	217	166	51		
10		2	1	1	1204	1088	116	208	152	56		
x <sup>□</sup>			1,1	0,5	0,6	1957,5	1750,2	207,3	353,95	234,8	119,15	
10	2	1	0	0	0	1387	1185	202	661	214	447	
		2	1	0	1	1493	1257	236	456	221	235	
		3	1	0	1	1432	1386	46	587	183	404	
		4	2	1	1	1458	1297	161	708	205	503	
		5	1	1	0	1672	1325	347	677	235	442	
		6	0	0	0	1463	1320	143	568	182	386	

Tinggi (cm)	Ukuran (cm)	Waktu (menit)	NO (ppm)		Selisih ppm	CO (ppm)		Selisih ppm	SO <sub>2</sub> (ppm)		Selisih ppm	
			inlet	outlet		inlet	outlet		inlet	outlet		
		7	3	1	2	1357	1218	139	451	207	244	
		8	5	3	2	1421	1307	114	366	188	178	
		9	1	1	0	1315	1167	148	236	175	61	
		10	1	1	0	1206	1124	82	221	129	92	
	x□		1,5	0,8	0,7	1420,4	1258,6	161,8	493,1	193,9	299,2	
	4	1	0	0	0	1152	1042	110	575	183	392	
		2	1	0	1	1326	1167	159	686	216	470	
		3	2	1	1	1389	1025	364	535	217	318	
		4	0	0	0	1289	1054	235	427	256	171	
		5	1	1	0	1422	1176	246	614	242	372	
		6	3	1	2	1673	1169	504	886	253	633	
		7	3	1	2	1564	1015	549	535	268	267	
		8	1	0	1	1338	1126	212	383	227	156	
		9	1	1	0	1263	1109	154	269	193	76	
		10	0	0	0	1123	1078	45	156	127	29	
	x□		1,2	0,5	0,7	1353,9	1096,1	257,8	506,6	218,2	288,4	
	6	1	1	0	1	1489	1461	28	585	276	309	
		2	1	0	1	1483	1452	31	662	305	357	
		3	3	1	2	1482	1438	44	751	389	362	
		4	2	1	1	1475	1416	59	736	375	361	
		5	3	2	1	1471	1398	73	885	276	609	
		6	2	1	1	1498	1415	83	576	228	348	
		7	1	0	1	1517	1495	22	612	263	349	
		8	1	0	1	1523	1512	11	388	216	172	
		9	0	0	0	1458	1406	52	275	189	86	
		10	1	0	1	1416	1378	38	213	155	58	
	x□		1,5	0,5	1	1481,2	1437,1	44,1	568,3	267,2	301,1	
	15	2	1	1	1	0	1808	1739	69	622	251	371
			2	3	1	2	1827	1783	44	428	182	246
			3	3	2	1	1856	1764	92	576	155	421
4			2	1	1	1873	1788	85	438	266	172	
5			1	1	0	1892	1793	99	991	383	608	
6			1	0	1	1863	1795	68	763	176	587	
7			0	0	0	1834	1763	71	641	185	456	
8			1	1	0	1827	1782	45	837	237	600	
9			1	1	0	1813	1765	48	528	132	396	
10			3	1	2	1810	1768	42	376	115	261	
x□			1,6	0,9	0,7	1840,3	1774	66,3	620	208,2	411,8	
4		1	0	0	0	1743	1674	69	785	177	608	
		2	1	0	1	1926	1709	217	581	291	290	



Tinggi (cm)	Ukuran (cm)	Waktu (menit)	NO (ppm)		Selisih ppm	CO (ppm)		Selisih ppm	SO <sub>2</sub> (ppm)		Selisih ppm
			<i>inlet</i>	<i>outlet</i>		<i>inlet</i>	<i>outlet</i>		<i>inlet</i>	<i>outlet</i>	
		3	1	1	0	1892	1693	199	428	297	131
		4	1	1	0	2198	1698	500	856	285	571
		5	3	1	2	2481	1629	852	416	273	143
		6	5	3	2	1989	1739	250	587	164	423
		7	1	1	0	1911	1628	283	371	158	213
		8	1	0	1	2002	1512	490	329	184	145
		9	2	1	1	1917	1598	319	283	115	168
		10	1	1	0	1634	1477	157	169	102	67
	x □		1,6	0,9	0,7	1969,3	1635,7	333,6	480,5	204,6	275,9
	6	1	1	1	0	1848	1673	175	595	186	409
		2	1	0	1	1821	1656	165	672	123	549
		3	2	0	2	1825	1676	149	581	363	218
		4	3	1	2	1839	1689	150	965	642	323
		5	2	1	1	1812	1726	86	895	283	612
		6	5	3	2	1738	1688	50	459	261	198
		7	3	1	2	1803	1798	5	262	135	127
		8	2	1	1	1725	1692	33	383	127	256
		9	1	0	1	1681	1625	56	226	116	110
	10	0	0	0	1676	1622	54	153	112	41	
	x □		2	0,8	1,2	1776,8	1684,5	92,3	519,1	234,8	284,3

C. Hasil Pengukuran Emisi *input* dan *output* pada reaktor *double venturi vacuum*

Tinggi (cm)	Ukuran (cm)	Waktu (menit)	NO (ppm)		Selisih ppm	CO (ppm)		Selisih ppm	SO <sub>2</sub> (ppm)		Selisih ppm	
			<i>inlet</i>	<i>outlet</i>		<i>inlet</i>	<i>outlet</i>		<i>inlet</i>	<i>outlet</i>		
5	2	1	2	1	1	1464	1298	166	532	184	348	
		2	1	1	0	1569	1208	361	428	182	246	
		3	0	0	0	1411	1193	218	576	165	411	
		4	1	0	1	1473	1212	261	848	186	662	
		5	1	1	0	1556	1136	420	491	213	278	
		6	5	3	2	1283	1178	105	563	176	387	
		7	2	1	1	1377	1156	221	541	195	346	
		8	1	1	0	1320	1124	196	437	137	300	
		9	1	0	1	1398	1219	179	228	182	46	
		10	1	0	1	1225	1181	44	176	115	61	
	x			1,5	0,8	0,7	1407,6	1190,5	217,1	482	173,5	308,5
	4	1	1	1	0	1462	1253	209	494	156	338	
		2	3	2	1	1584	1296	288	503	178	325	
		3	1	0	1	1873	1387	486	643	191	452	
		4	2	1	1	2115	1543	572	558	215	343	
		5	0	0	0	1846	1658	188	731	210	521	
		6	3	1	2	1978	1693	285	678	197	481	
		7	5	2	3	1672	1239	433	391	206	185	
		8	3	1	2	1636	1214	422	246	184	62	
		9	1	1	0	1489	1108	381	183	141	42	
		10	1	0	1	1391	1176	215	174	135	39	
	x			2	0,9	1,1	1704,6	1356,7	347,9	460,1	181,3	278,8
	6	1	0	0	0	1215	990	225	459	261	198	
		2	1	1	0	1366	1040	326	472	318	154	
		3	1	1	0	1532	1368	164	594	258	336	
		4	3	1	2	1488	1152	336	678	244	434	
		5	5	3	2	1661	1286	375	766	210	556	
		6	0	0	0	1345	1235	110	553	166	387	
		7	1	1	0	1468	1056	412	476	152	324	
		8	1	1	0	1290	980	310	394	157	237	
		9	3	1	2	1242	883	359	251	124	127	
		10	1	1	0	1012	789	223	132	106	26	
	x			1,6	1	0,6	1361,9	1077,9	284	477,5	199,6	277,9
10	2	1	1	0	1	1435	1131	304	442	267	175	
		2	2	1	1	1497	1246	251	588	283	305	
		3	1	1	0	1558	1251	307	647	298	349	
		4	3	2	1	1763	1232	531	572	289	283	
		5	5	3	2	1678	1249	429	595	272	323	
		6	2	1	1	1431	1227	204	635	268	367	

Tinggi (cm)	Ukuran (cm)	Waktu (menit)	NO (ppm)		Selisih ppm	CO (ppm)		Selisih ppm	SO <sub>2</sub> (ppm)		Selisih ppm	
			inlet	outlet		inlet	outlet		inlet	outlet		
		7	1	1	0	1526	1118	408	771	283	488	
		8	1	0	1	1415	1210	205	438	289	149	
		9	0	0	0	1389	1286	103	343	295	48	
		10	1	0	1	1176	1077	99	326	275	51	
		x		1,7	0,9	0,8	1486,8	1202,7	284,1	535,7	281,9	253,8
		4	1	0	0	0	1384	1265	119	342	256	86
			2	1	1	0	1476	1210	266	539	248	291
			3	1	1	0	1498	1316	182	527	270	257
			4	5	3	2	1723	1239	484	459	227	232
			5	3	2	1	1615	1356	259	662	236	426
			6	2	1	1	1382	1218	164	681	275	406
			7	1	1	0	1558	1289	269	715	228	487
			8	1	1	0	1421	1209	212	572	281	291
			9	1	0	1	1316	1138	178	428	225	203
			10	0	0	0	1227	1106	121	321	236	85
		x		1,5	1	0,5	1460	1234,6	225,4	524,6	248,2	276,4
		6	1	0	0	0	1342	1259	83	325	183	142
			2	1	1	0	1386	1276	110	443	182	261
			3	2	1	1	1373	1289	84	551	218	333
			4	1	1	0	1395	1346	49	628	186	442
			5	3	1	2	1412	1323	89	753	179	574
			6	5	2	3	1388	1321	67	536	203	333
			7	3	2	1	1331	1315	16	416	196	220
			8	1	1	0	1286	1225	61	398	166	232
			9	1	1	0	1278	1213	65	295	151	144
			10	1	0	1	1261	1210	51	186	165	21
		x		1,8	1	0,8	1345,2	1277,7	67,5	453,1	182,9	270,2
	15	2	1	1	1	0	1936	1852	84	386	203	183
			2	3	1	2	1921	1864	57	457	265	192
			3	1	1	0	1939	1873	66	558	287	271
			4	3	1	2	1972	1861	111	669	318	351
			5	5	3	2	1983	1877	106	712	325	387
			6	2	1	1	1945	1859	86	681	287	394
7			1	1	0	1937	1866	71	443	276	167	
8			1	1	0	1923	1873	50	362	212	150	
9			2	1	1	1915	1856	59	318	248	70	
10			1	1	0	1922	1843	79	286	234	52	
		x		2	1,2	0,8	1939,3	1862,4	76,9	487,2	265,5	221,7
		4	1	0	0	0	1734	1582	152	356	275	81
2			1	0	1	1842	1673	169	454	286	168	

Tinggi (cm)	Ukuran (cm)	Waktu (menit)	NO (ppm)		Selisih ppm	CO (ppm)		Selisih ppm	SO <sub>2</sub> (ppm)		Selisih ppm	
			<i>inlet</i>	<i>outlet</i>		<i>inlet</i>	<i>outlet</i>		<i>inlet</i>	<i>outlet</i>		
		3	1	1	0	1856	1682	174	623	234	389	
		4	3	2	1	1731	1633	98	732	253	479	
		5	5	3	2	1841	1698	143	642	281	361	
		6	3	2	1	1804	1672	132	534	253	281	
		7	3	1	2	1748	1689	59	482	262	220	
		8	1	1	0	1729	1622	107	315	224	91	
		9	1	1	0	1715	1614	101	310	241	69	
		10	1	0	1	1698	1588	110	289	197	92	
		x		1,9	1,1	0,8	1769,8	1645,3	124,5	473,7	250,6	223,1
		6	1	1	1	0	1786	1688	98	341	289	52
	2		2	1	1	1775	1698	77	458	276	182	
	3		3	2	1	1763	1682	81	515	268	247	
	4		5	3	2	1796	1648	148	653	305	348	
	5		7	5	2	1831	1762	69	735	312	423	
	6		3	1	2	1842	1731	111	462	308	154	
	7		2	1	1	1795	1723	72	572	298	274	
	8		1	0	1	1768	1665	103	446	264	182	
	9		1	1	0	1776	1668	108	328	231	97	
	10		1	0	1	1725	1646	79	276	215	61	
x		2,6	1,5	1,1	1785,7	1691,1	94,6	478,6	276,6	202		

## LAMPIRAN 2

### A. Nilai Efisiensi Setiap Parameter

Reaktor	Tinggi Media (cm)	Ukuran Media (cm)	NO (%)	CO (%)	SO <sub>2</sub> (%)	Suhu	
						<i>inlet</i>	<i>outlet</i>
<i>no venturi</i>	5	2	47,058	28,85	43,76	151,25	64,75
		4	38,46	18	38,46	153,25	68,5
		6	53,85	9,60	48,84	155,75	74,5
	10	2	50	12,65	57	171,5	68,75
		4	58,33	20,80	50,41	165,75	73
		6	53,33	15,48	49,37	175,75	65,75
	15	2	20	21,16	59,32	152,5	73,75
		4	56,25	14,22	51,27	168,75	64,5
		6	55	7,42	58,21	173	74,25
<i>single venturi</i>	5	2	35,29	29	45	151,25	64,75
		4	50	18,03	41,35	153,25	68,5
		6	54,55	10,60	33,66	155,75	74,5
	10	2	46,67	11,40	60,67	171,5	68,75
		4	66,67	19,04	56,92	165,75	73
		6	3,64	2,97	52,98	175,75	65,75
	15	2	9,13	3,60	66,87	152,5	73,75
		4	8,90	16,94	57,41	168,75	64,5
		6	4,95	5,19	54,76	173	74,25
<i>double venturi</i>	5	2	46,67	15,42	65,40	173	54,25
		4	55	20,41	60,59	163,25	60,75
		6	37,5	20,85	58,19	165,25	57,5
	10	2	1,17	19,10	47,37	165,5	68,5
		4	33,33	15,43	52,68	173,75	73
		6	1,24	5,01	59,63	168	67,75
	15	2	1,4	3,96	45,50	168,25	69
		4	1,32	7,03	47,10	172	72,75
		6	2,02	5,30	42,20	170,25	62,5

### LAMPIRAN 3

#### A. Data Pengukuran Suhu

Reaktor	Tinggi Media (cm)	Ukuran Media (cm)	Incinerator		Wet Scrubber	
			T 1	T 1	inlet	outlet
No Venturi	5	2	835	484,75	151,25	64,75
		4	835,25	485,25	153,25	68,5
		6	835,75	485,75	155,75	74,5
		x□	835,33	485,25	153,4167	69,25
	10	2	836,25	485,75	171,5	68,75
		4	837	486,25	165,75	73
		6	837,75	486,5	175,75	65,75
		x□	837	486,1667	171	69,16
	15	2	838,75	487,25	152,5	73,75
		4	840	487,25	168,75	64,5
		6	841,25	487,75	173	74,25
		x□	840	487,41	164,75	70,83
Single Venturi	5	2	835	484,75	151,25	64,75
		4	835,25	485,25	153,25	68,5
		6	835,75	485,75	155,75	74,5
		x□	835,33	485,25	153,41	69,25
	10	2	836,25	485,75	171,5	68,75
		4	837	486,25	165,75	73
		6	837,75	486,5	175,75	65,75
		x□	837	486,16	171	69,16
	15	2	838,75	487,25	152,5	73,75
		4	840	487,25	168,75	64,5
		6	841,25	487,75	173	74,25
		x□	840	487,41	164,75	70,83
Double Venturi	5	2	842,25	488	173	54,25
		4	842,75	488,75	163,25	60,75
		6	844	489,25	165,25	57,5
		x□	843	488,6	167,16	57,5
	10	2	844,75	489,25	165,5	68,5
		4	846	489,75	173,75	73
		6	847	490,5	168	67,75
		x□	845,91	489,83	169,08	69,75
	15	2	848,25	491	168,25	69
		4	849	491,25	172	72,75
		6	849,5	491,75	170,25	62,5
		x□	848,91	491,33	170,16	68,08

## LAMPIRAN 4

Pada variasi variabel disajikan pada tabel berikut untuk mempermudah dalam pembacaan grafik yang disajikan.

**Tabel Variasi Percobaan Penelitian**

Jumlah Venturi	Ukuran Dimensi Media	Tinggi Media Filter		
		TM1	TM2	TM3
WNV	UM1	WNV;UM1;TM1	WNV;UM1;TM2	WNV;UM1;TM3
	UM2	WNV;UM2;TM1	WNV;UM2;TM2	WNV;UM2;TM3
	UM3	WNV;UM3;TM1	WNV;UM3;TM2	WNV;UM3;TM3
WSV	UM1	WSV;UM1;TM1	WSV;UM1;TM2	WSV;UM1;TM3
	UM2	WSV;UM2;TM1	WSV;UM2;TM2	WSV;UM2;TM3
	UM3	WSV;UM3;TM1	WSV;UM3;TM2	WSV;UM3;TM3
WDV	UM1	WDV;UM1;TM1	WDV;UM1;TM2	WDV;UM1;TM3
	UM2	WDV;UM2;TM1	WDV;UM2;TM2	WDV;UM2;TM3
	UM3	WDV;UM3;TM1	WDV;UM3;TM2	WDV;UM3;TM3

Keterangan:

Jumlah Venturi:

WNV = *Wet Scrubber No Venturi*

WSV = *Wet Scrubber Single Venturi*

WDV = *Wet Scrubber Double Venturi*

Ukuran Dimensi Media:

UM1 = 2 cm

UM2 = 4 cm

UM3 = 6 cm

Tinggi Media Filter:

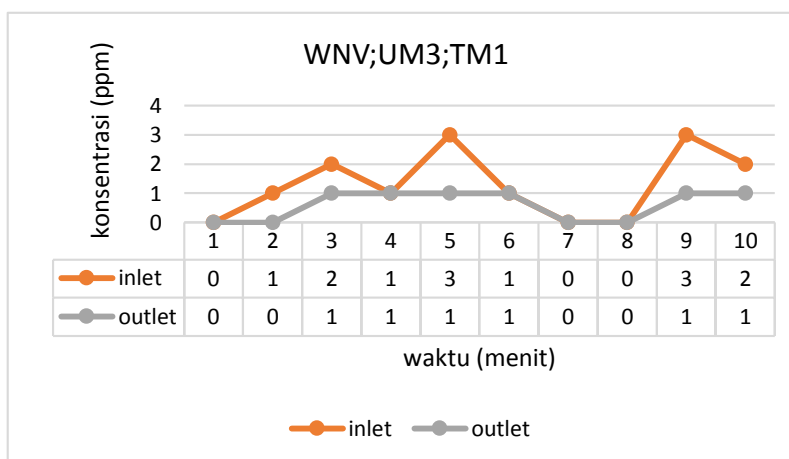
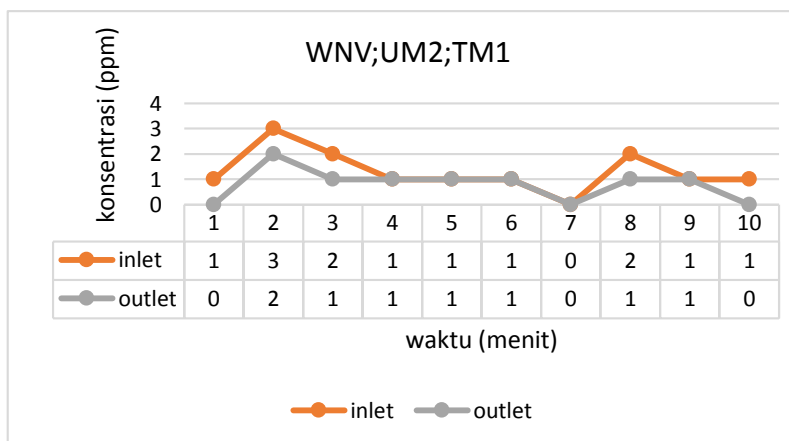
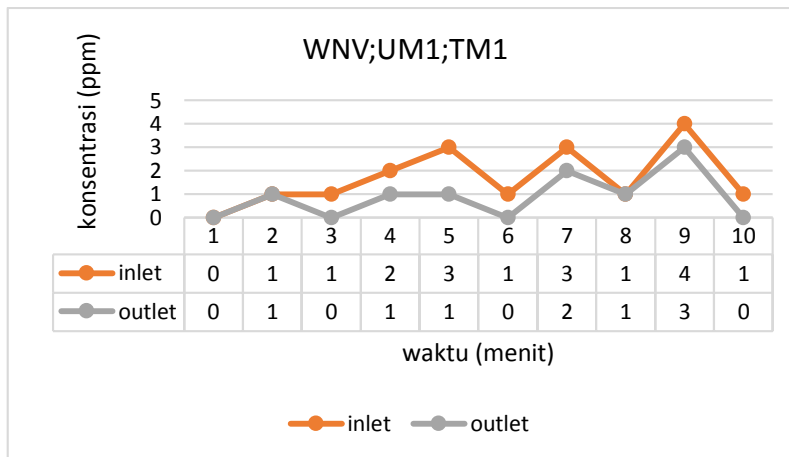
TM1 = 5 cm

TM2 = 10 cm

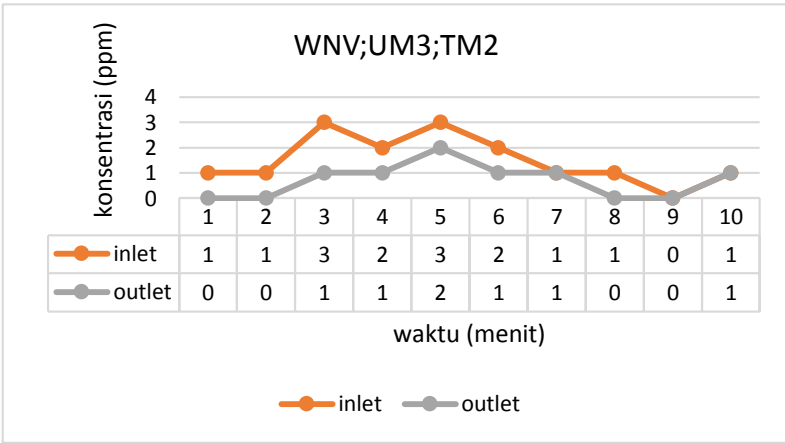
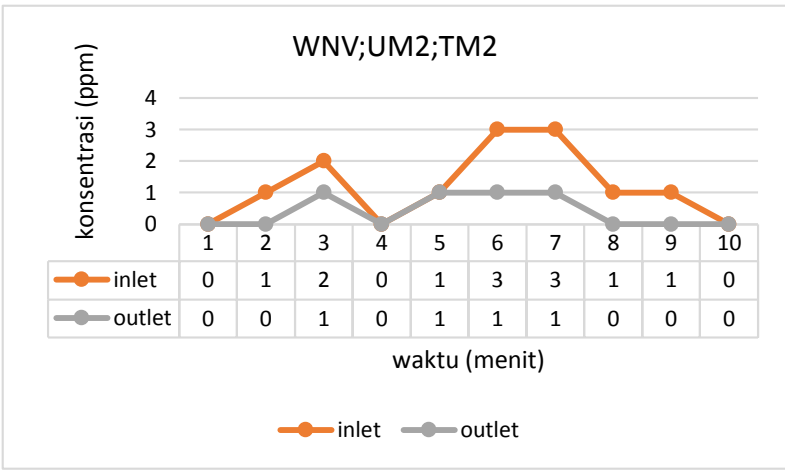
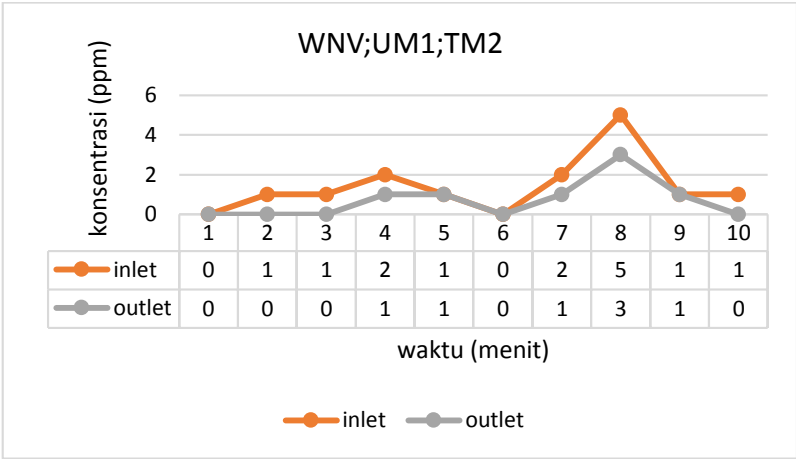
TM3 = 15 cm

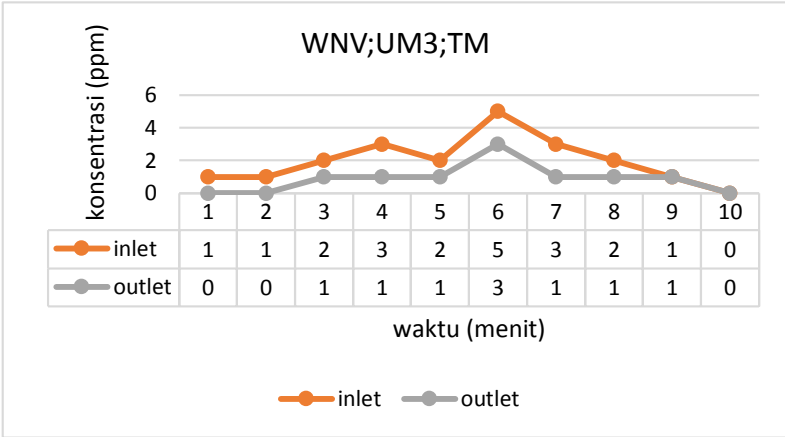
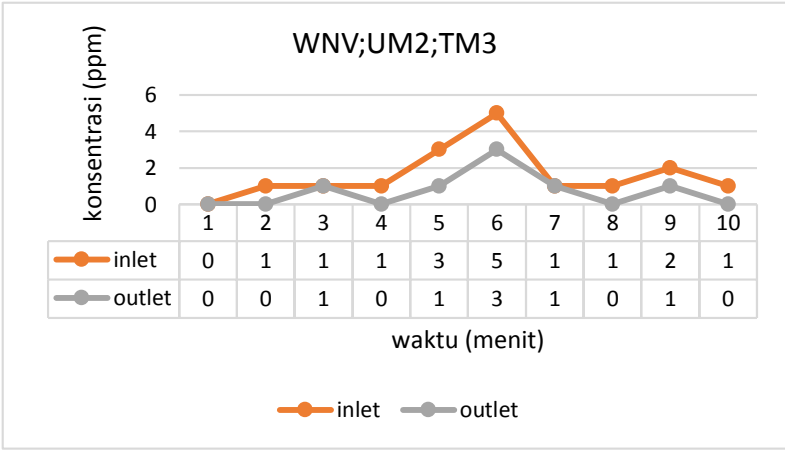
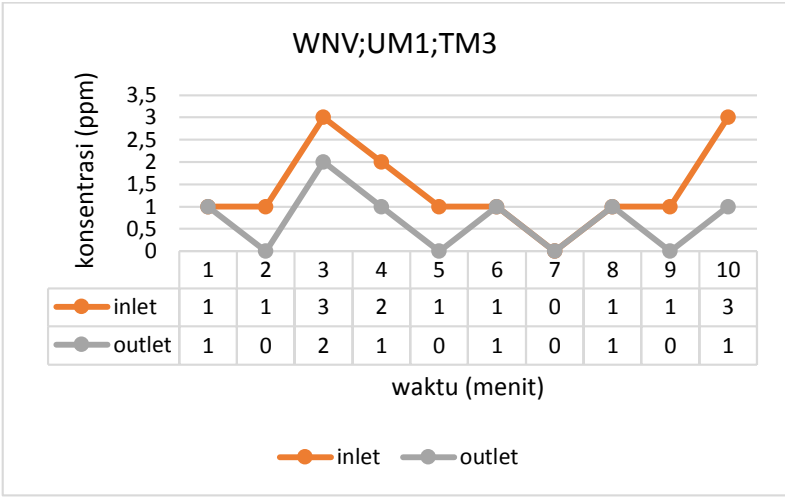
## A. Pada *No Venturi Vacuum*

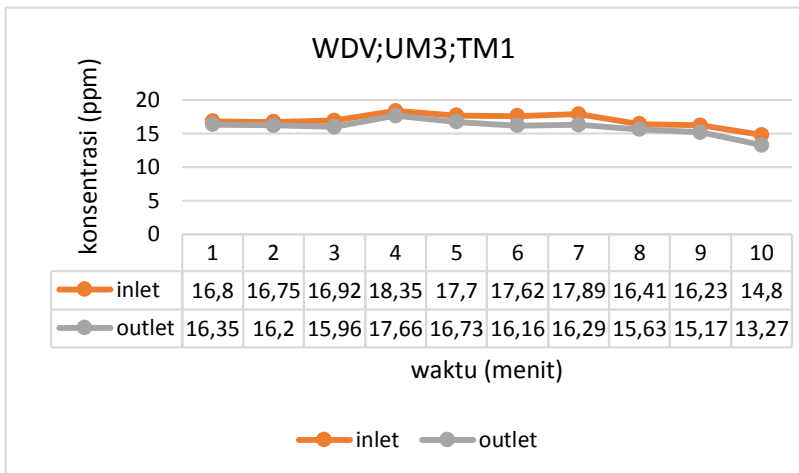
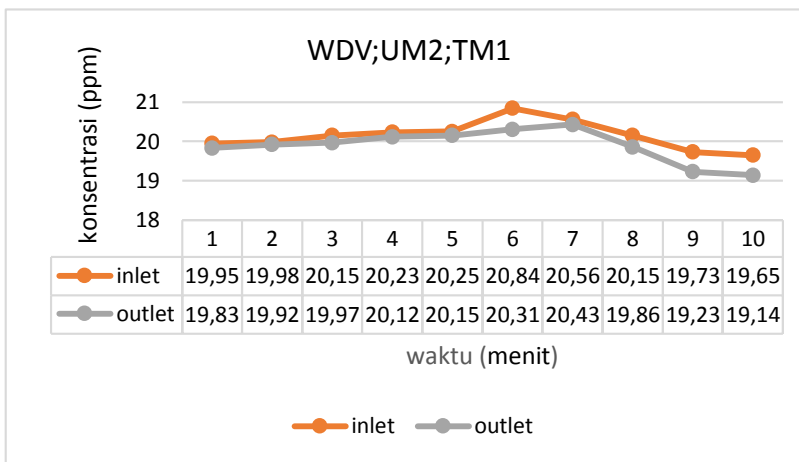
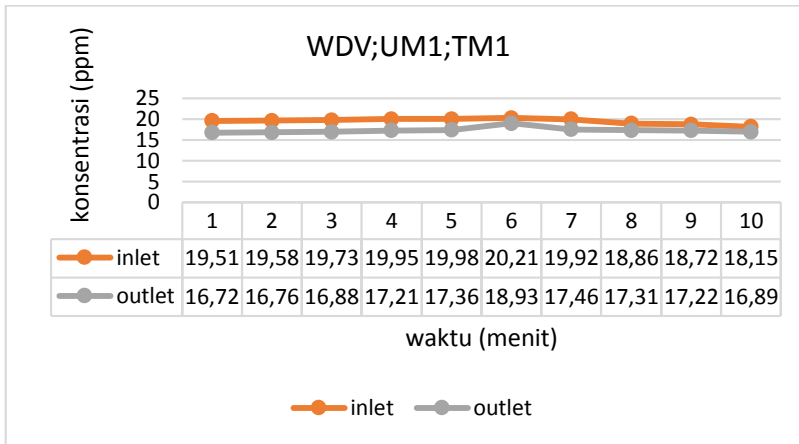
### a. Grafik Nilai Emisi Gas NO

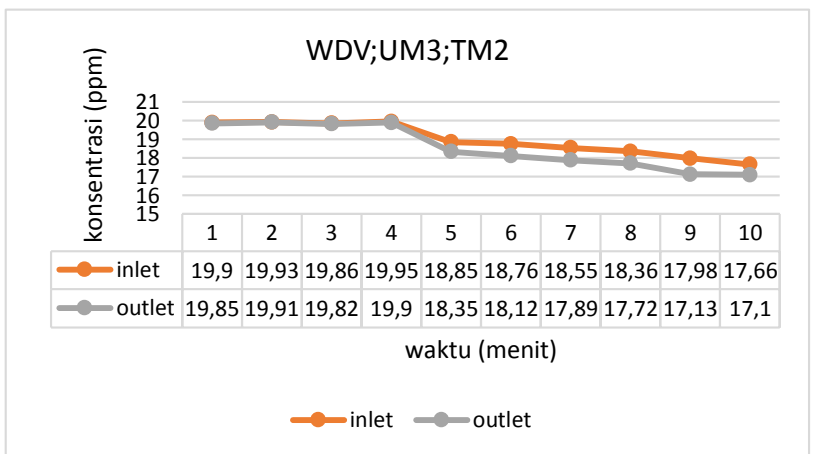
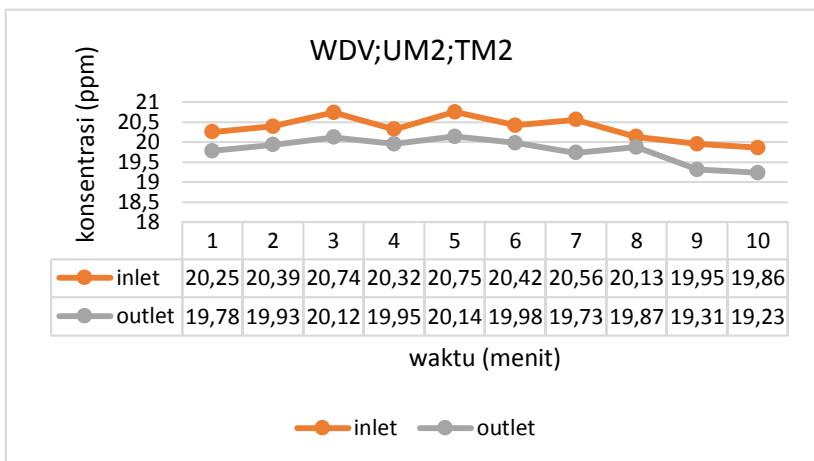
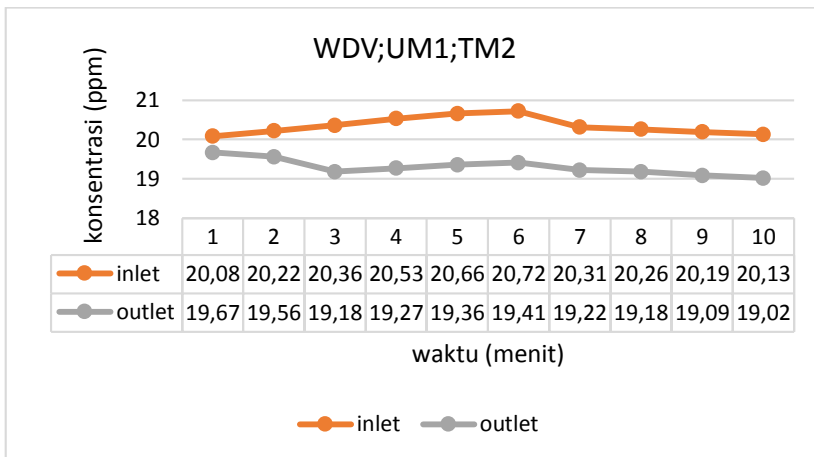


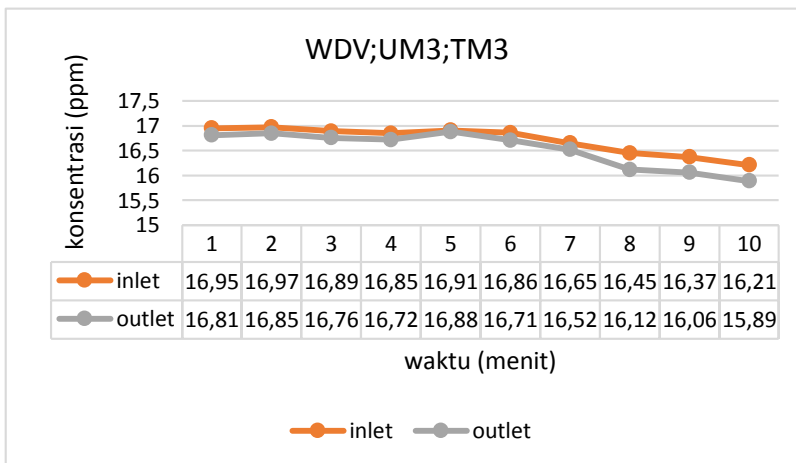
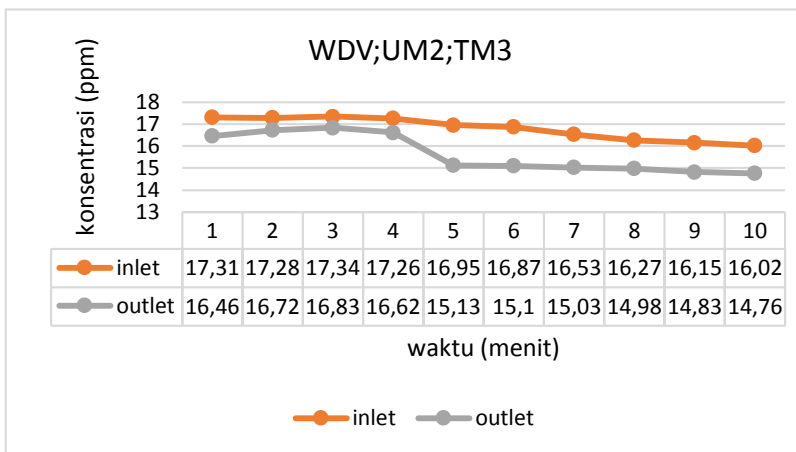
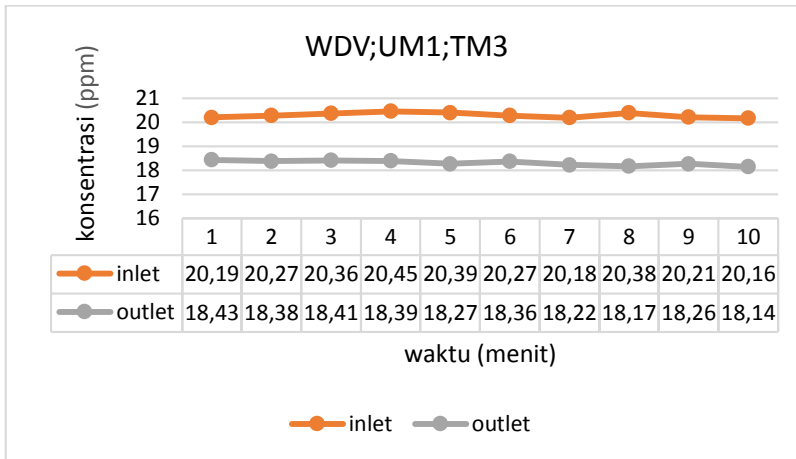




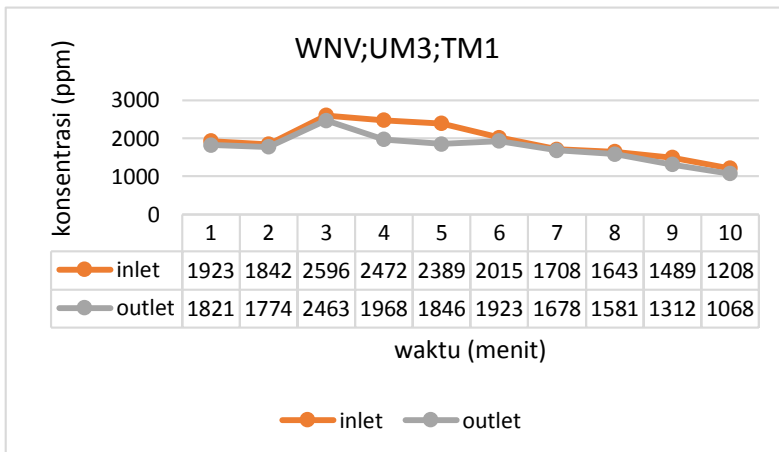
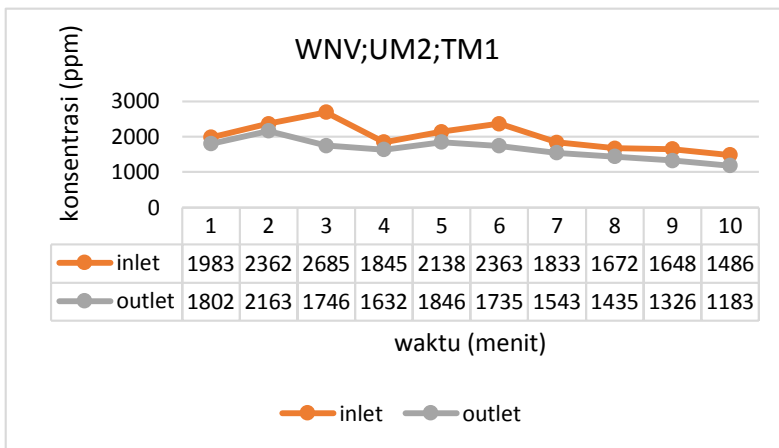
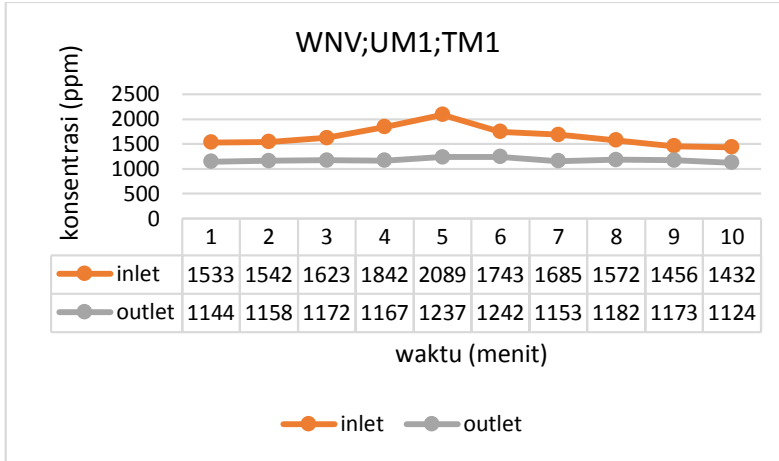


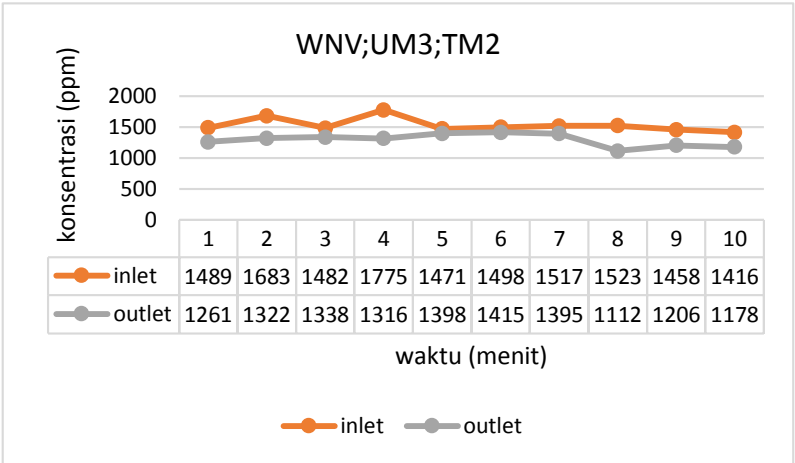
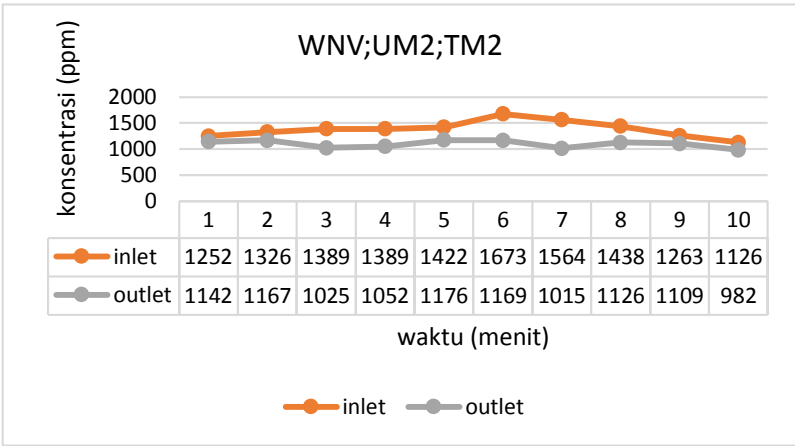
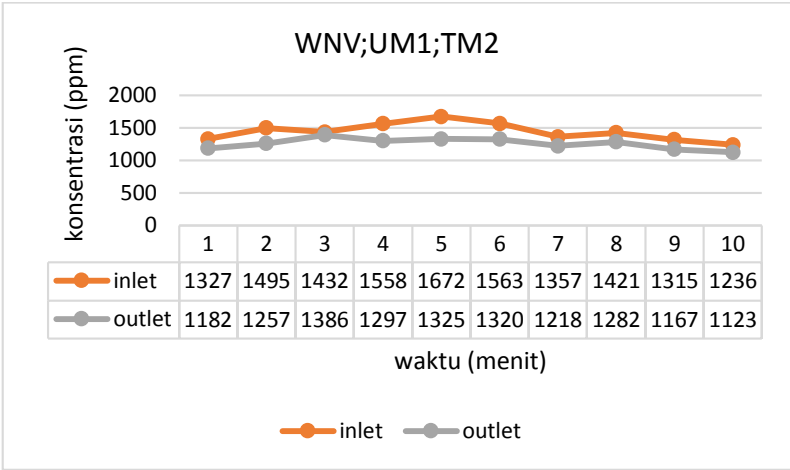


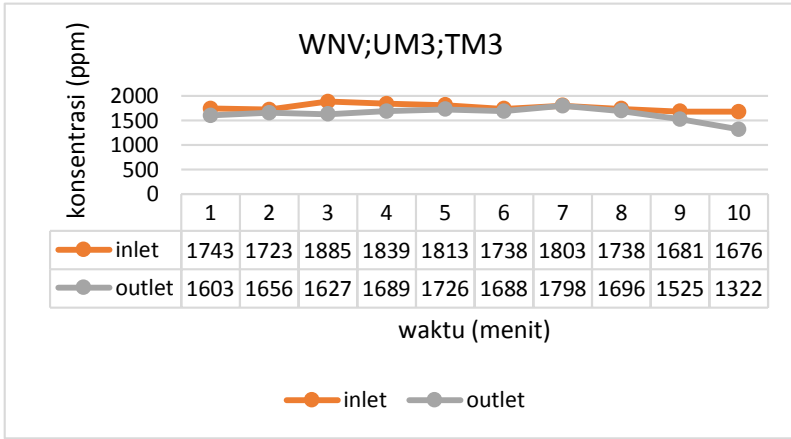
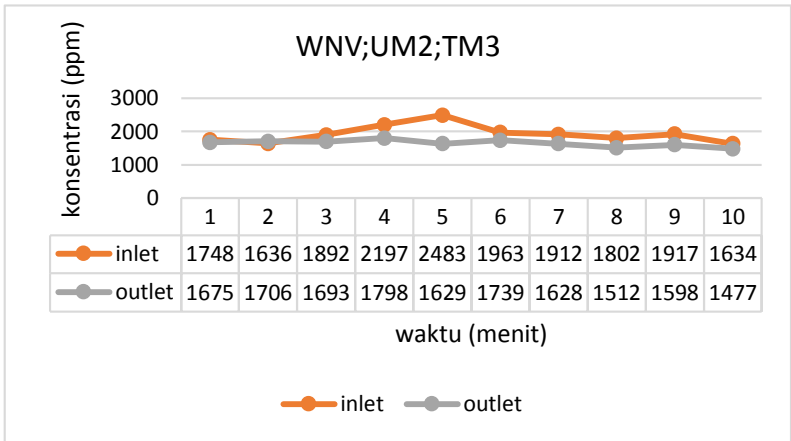
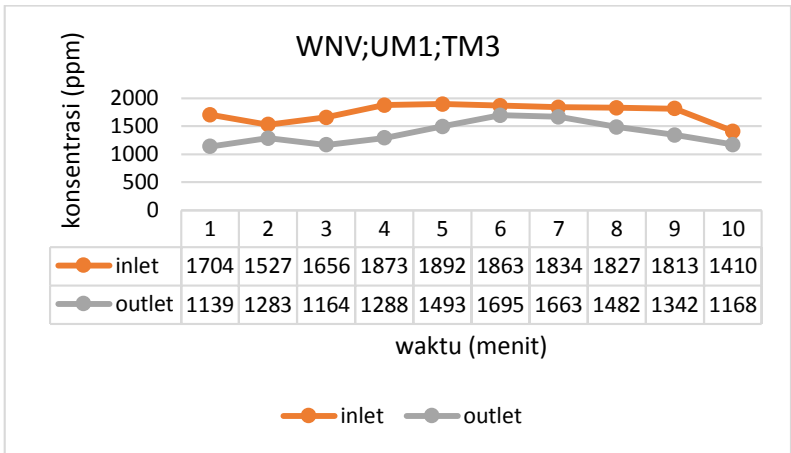




**b. Grafik Nilai Emisi Gas CO**

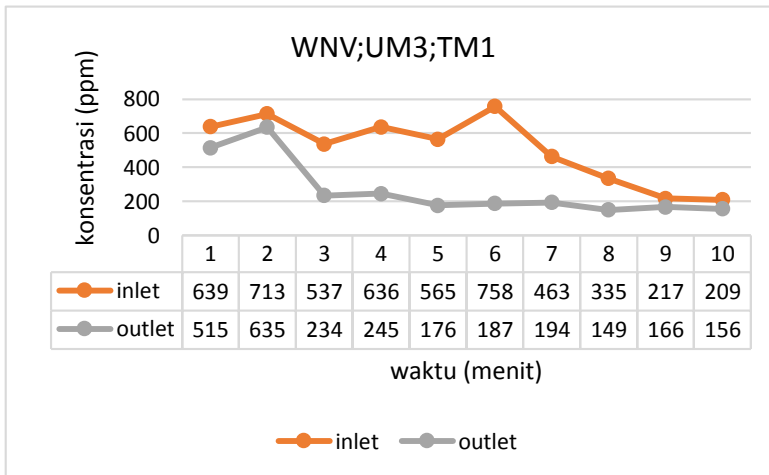
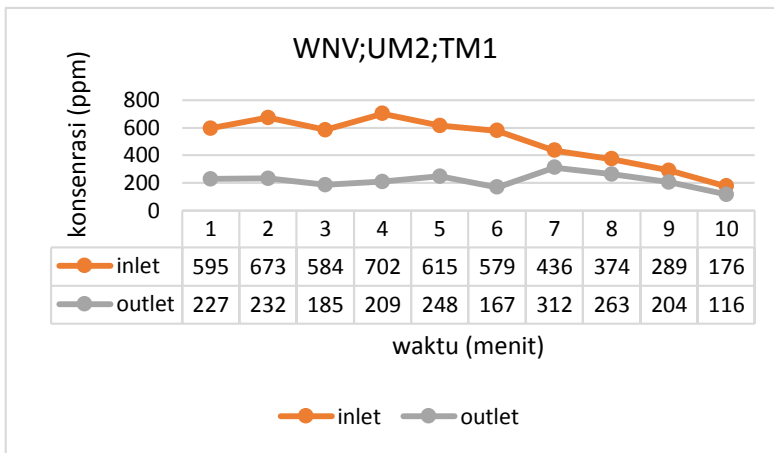
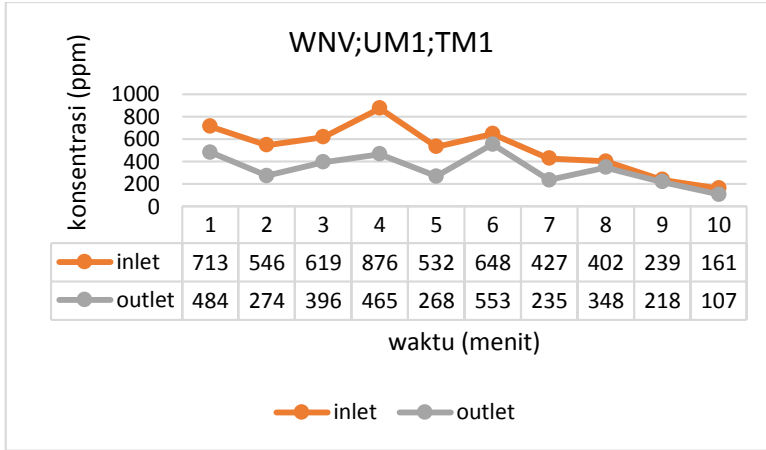


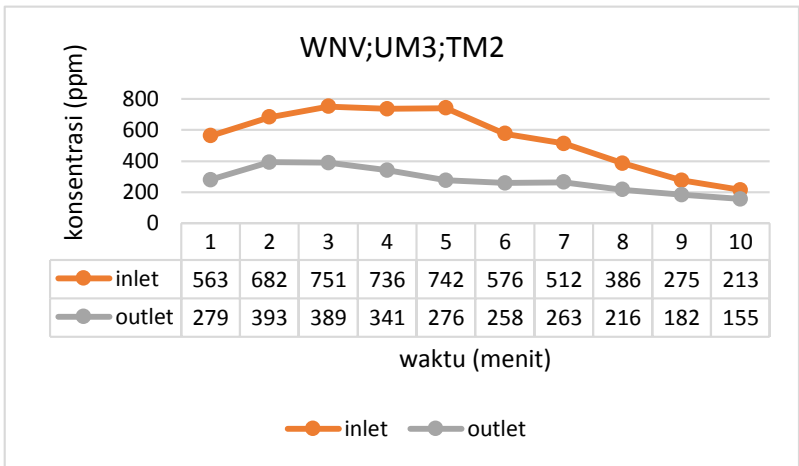
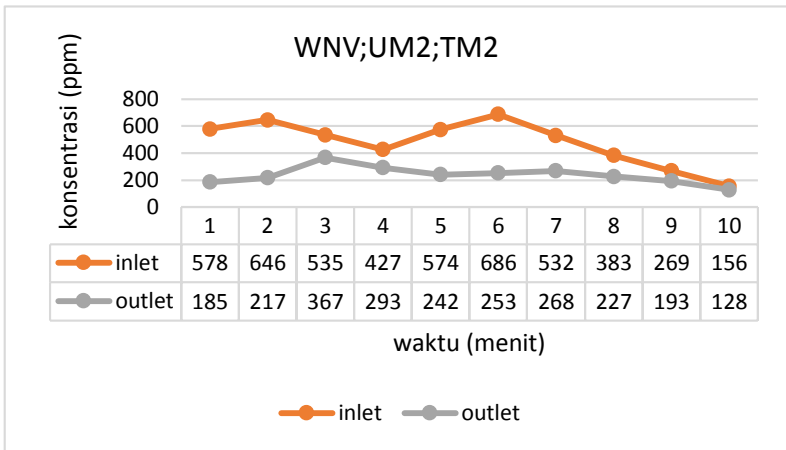
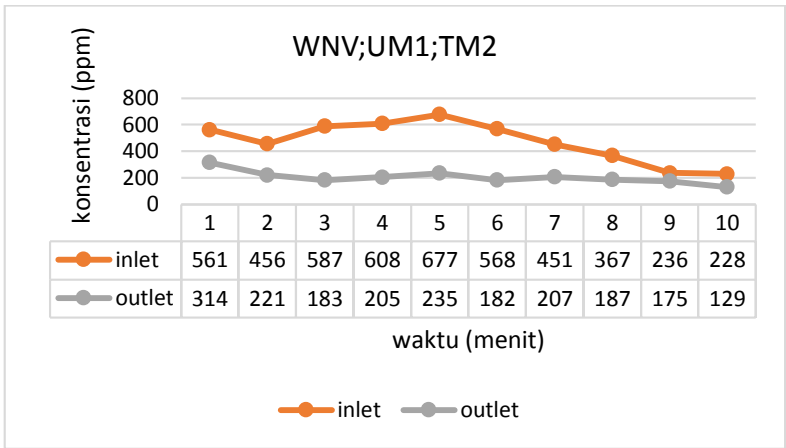


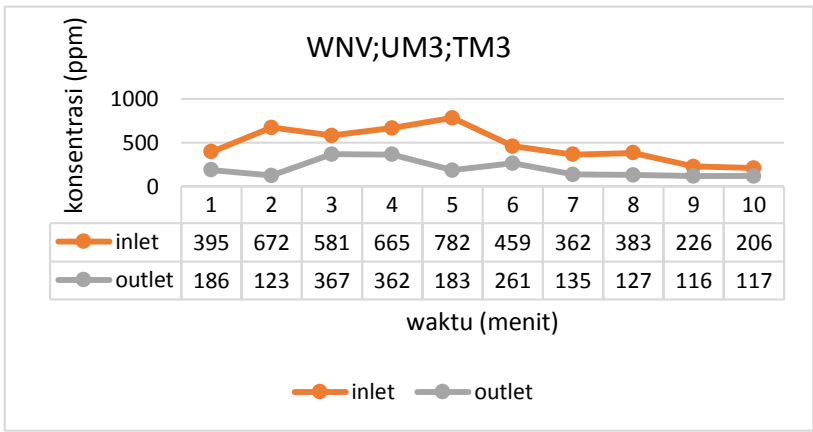
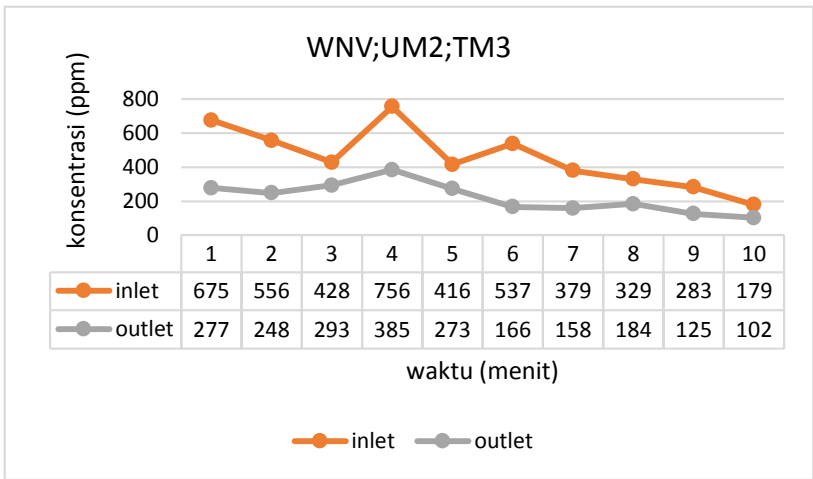
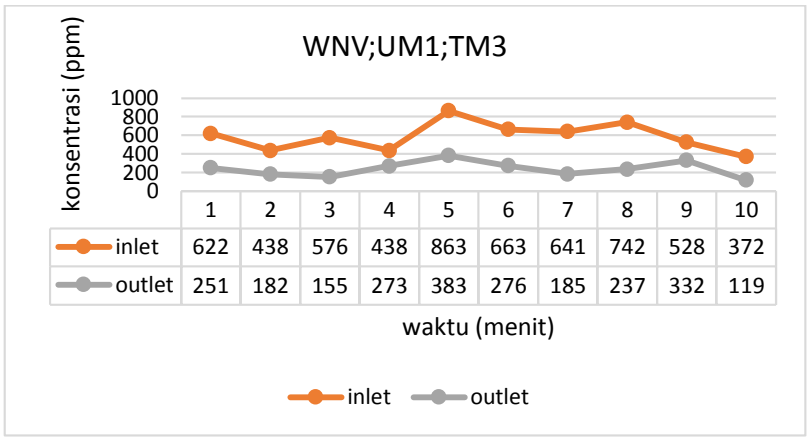




**c. Grafik Nilai Emisi Gas SO<sub>2</sub>**

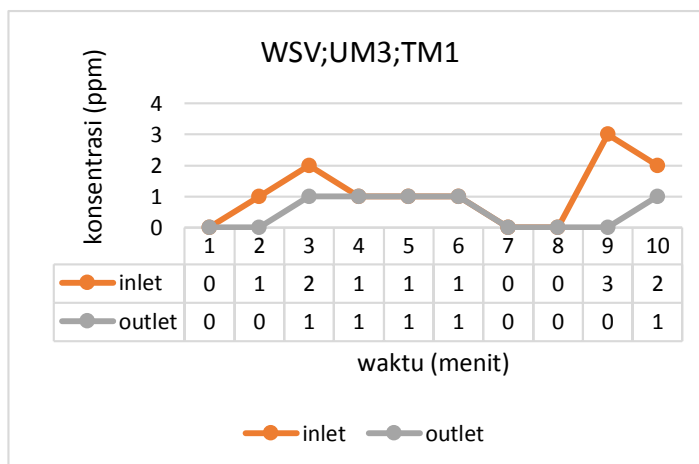
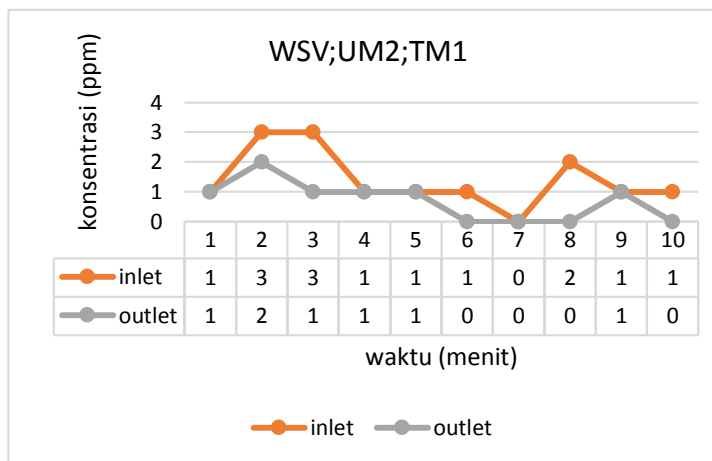
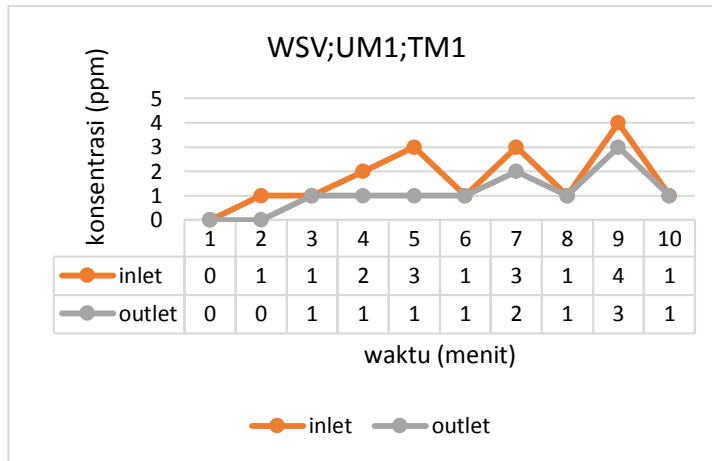


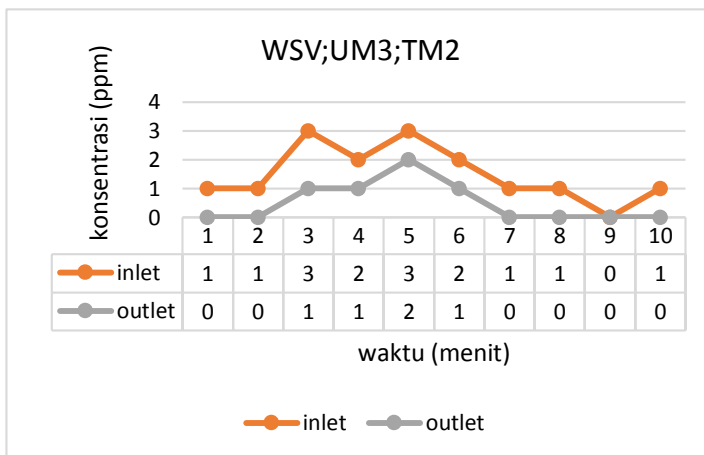
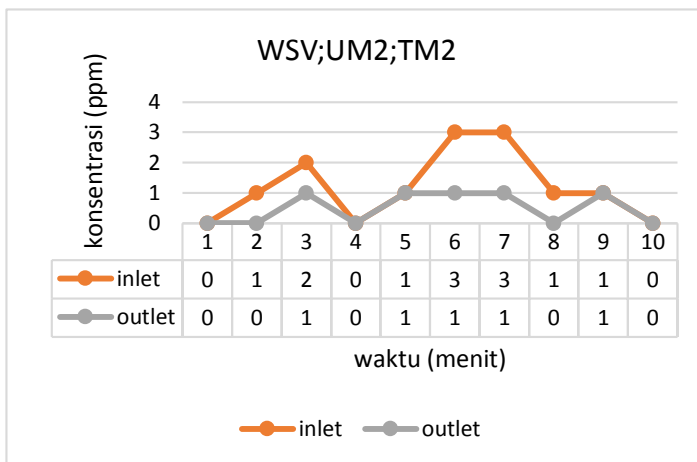
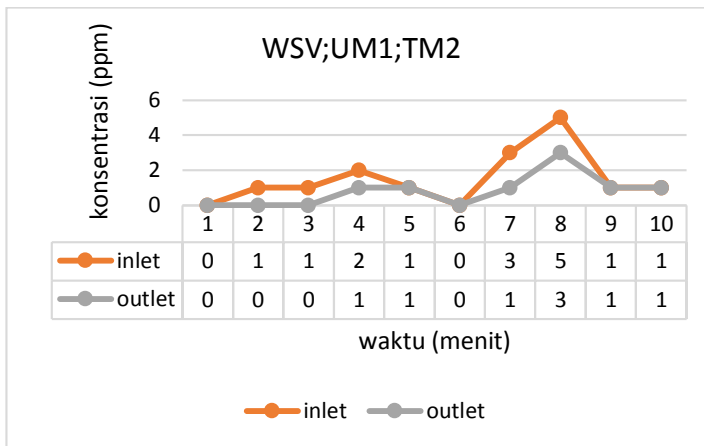


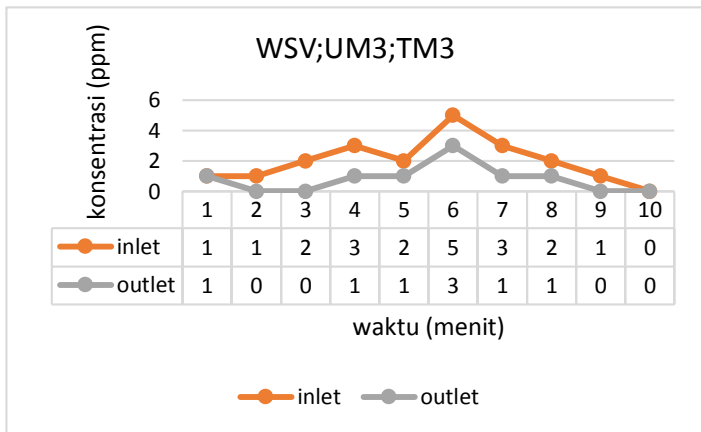
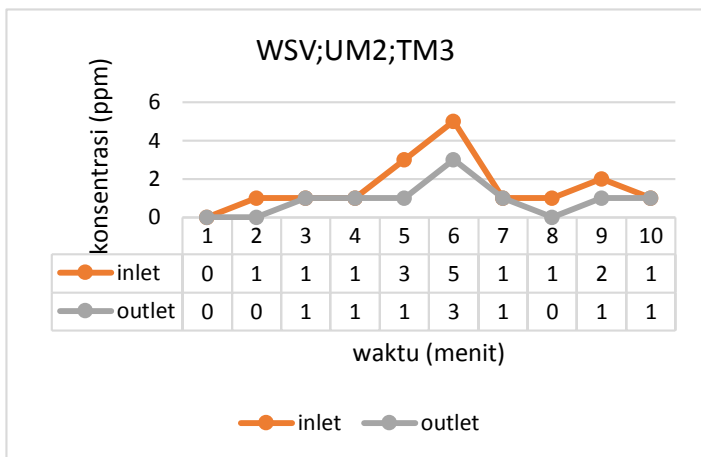
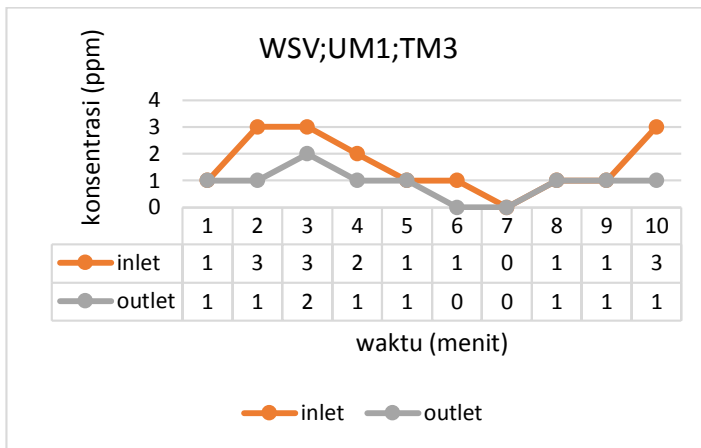


## B. Pada *Single Venturi Vacuum*

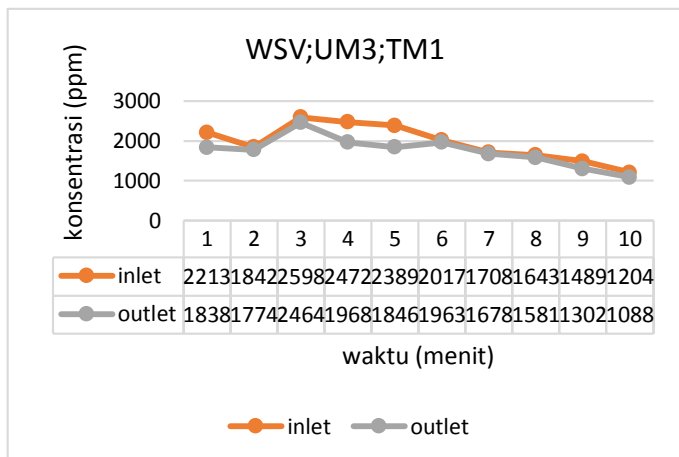
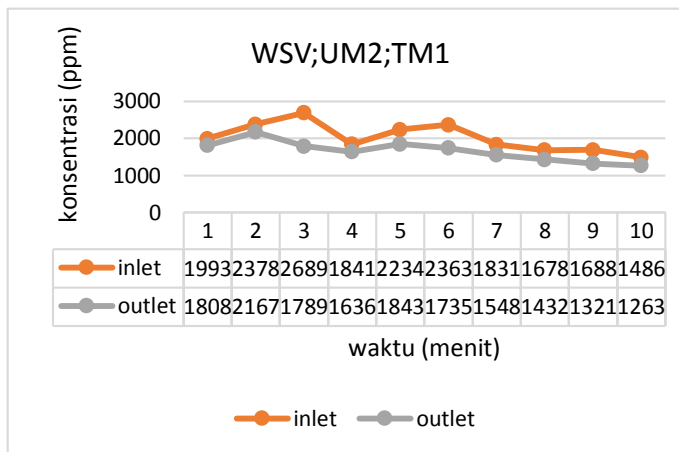
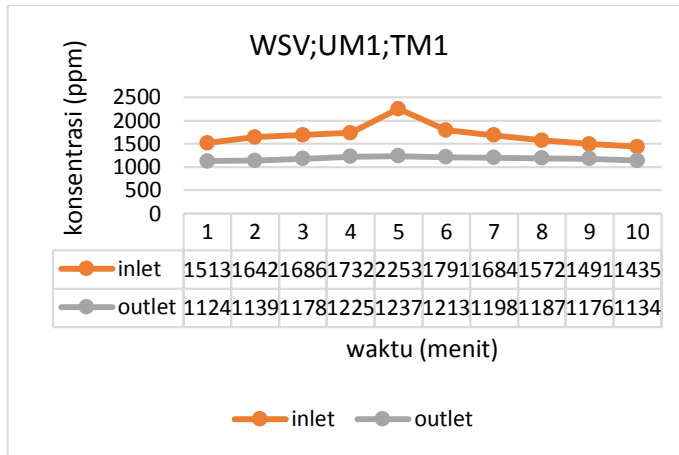
### a. Grafik Nilai Emisi Gas NO

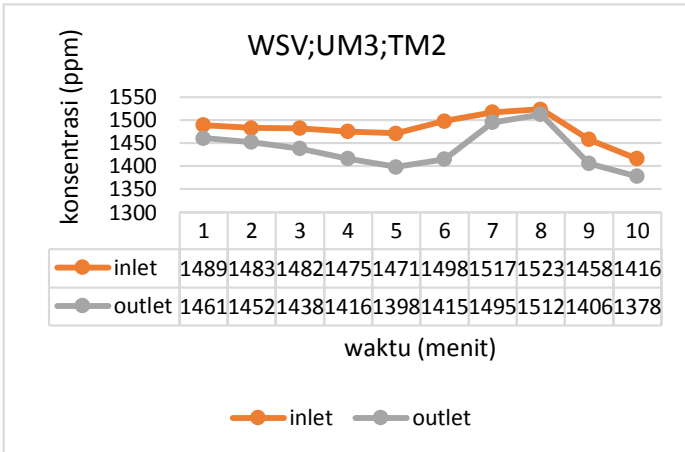
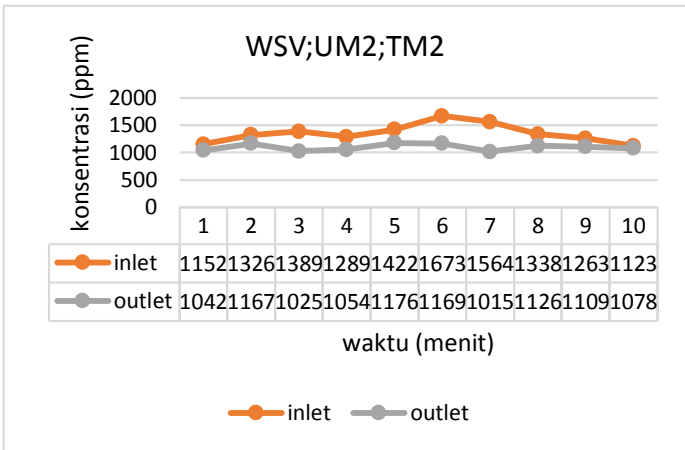
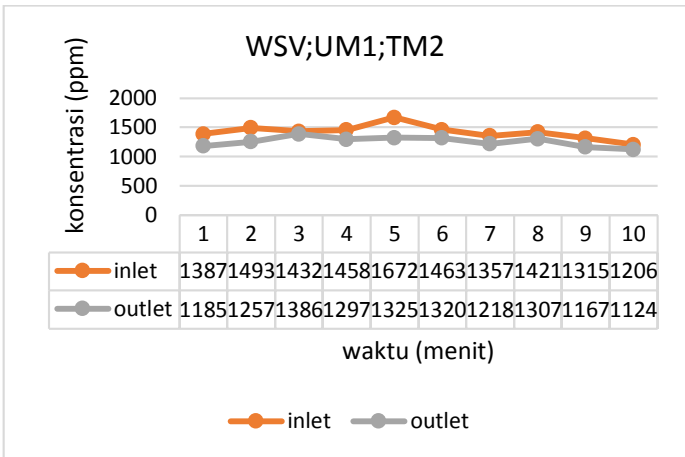




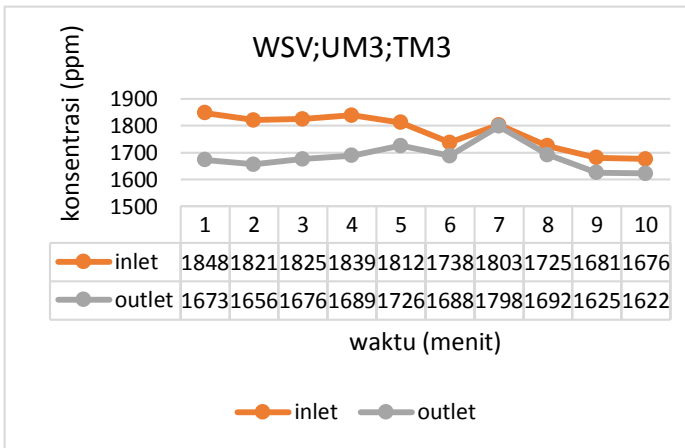
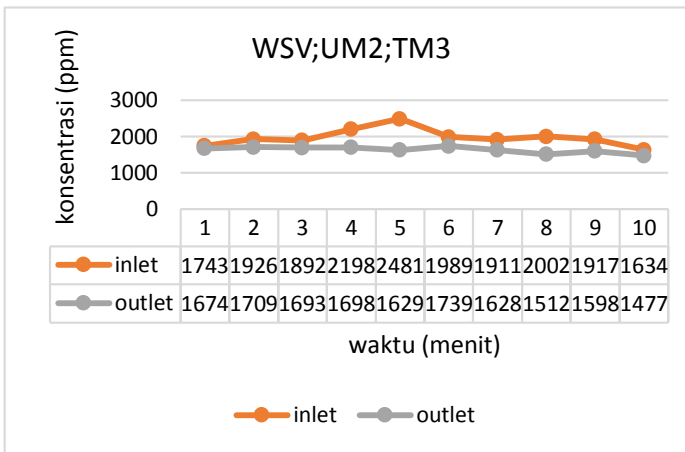
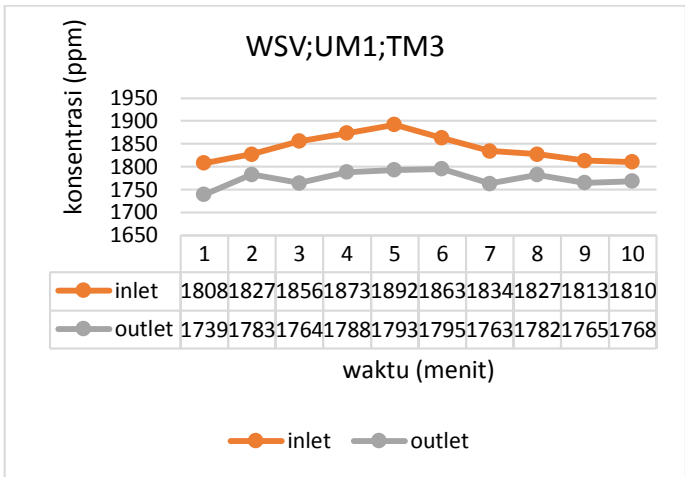


**b. Grafik Nilai Emisi Gas CO**

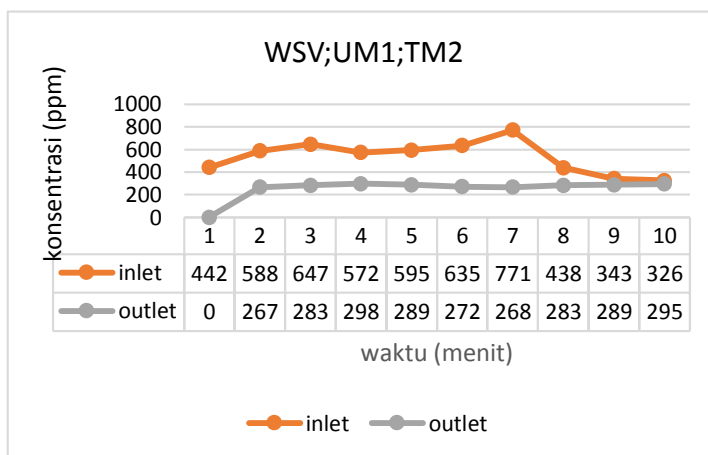
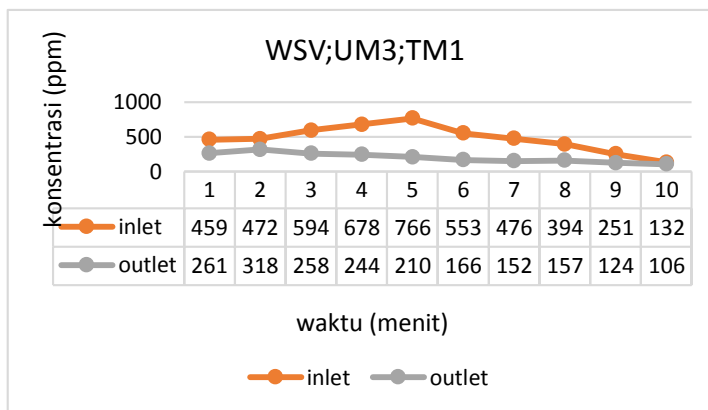
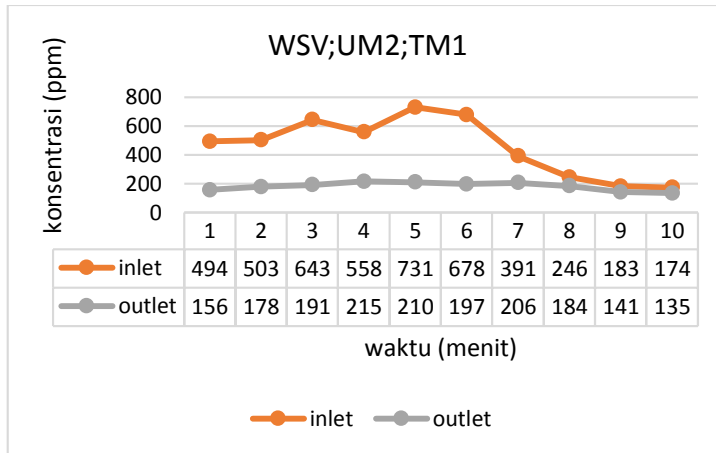


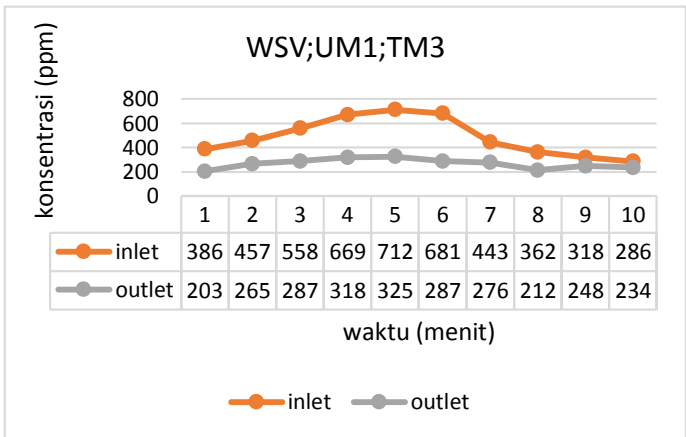
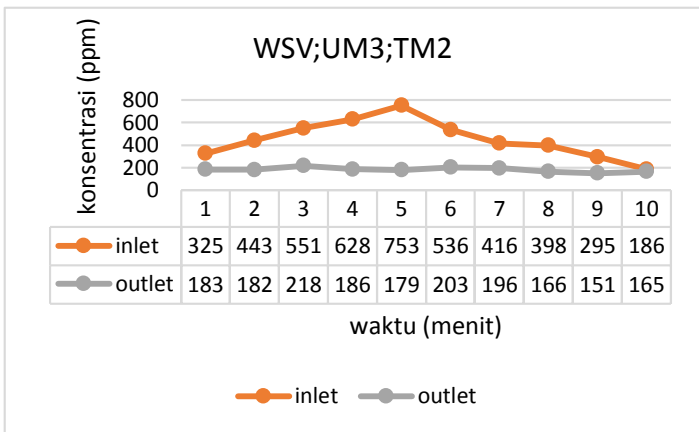
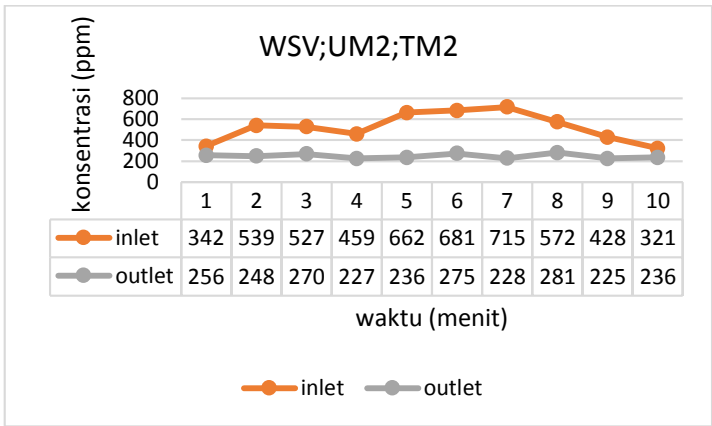


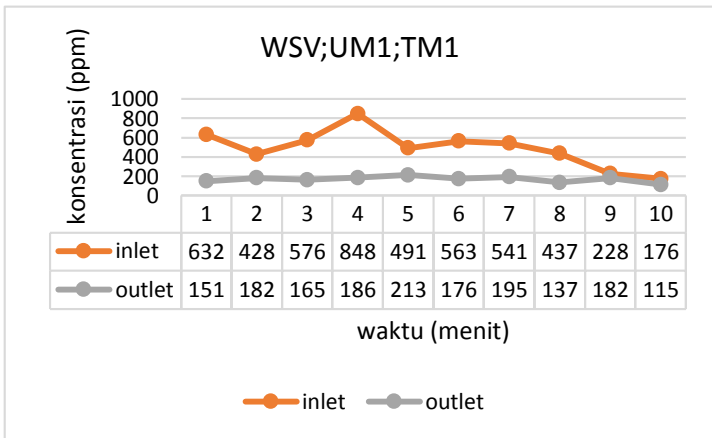
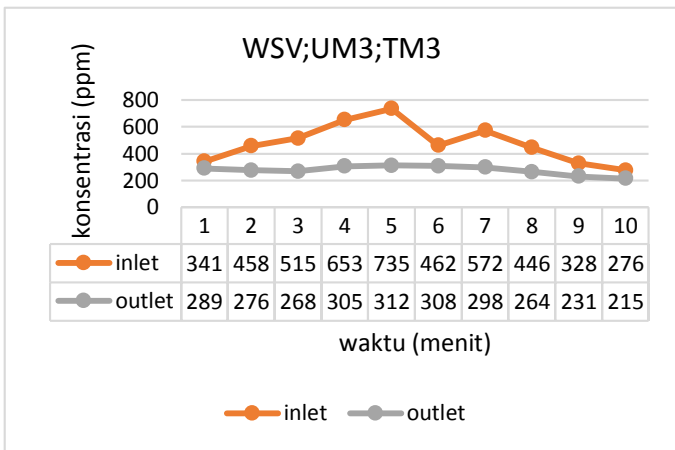
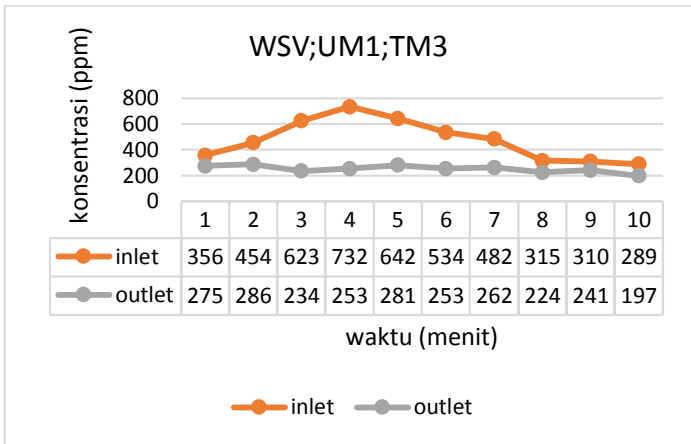




**c. Grafik Nilai Emisi Gas SO<sub>2</sub>**

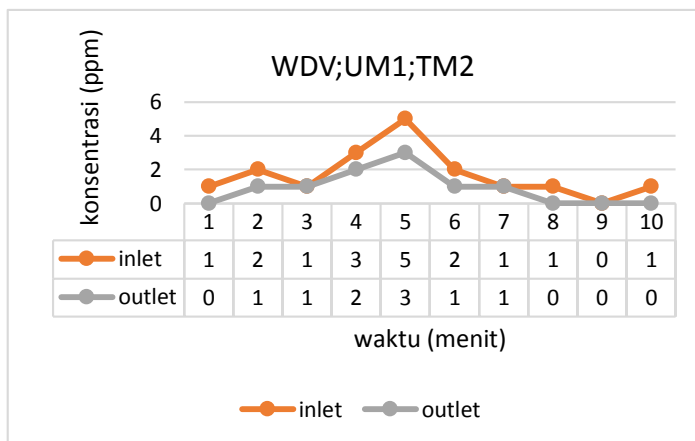
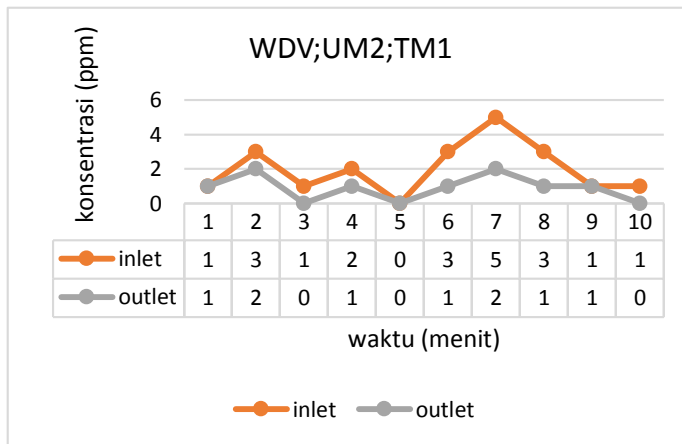
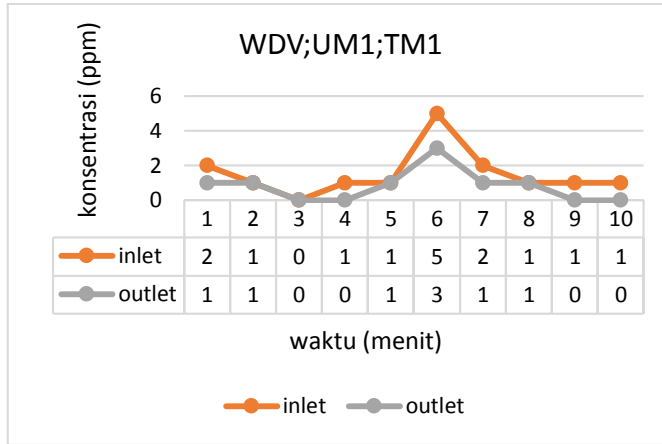


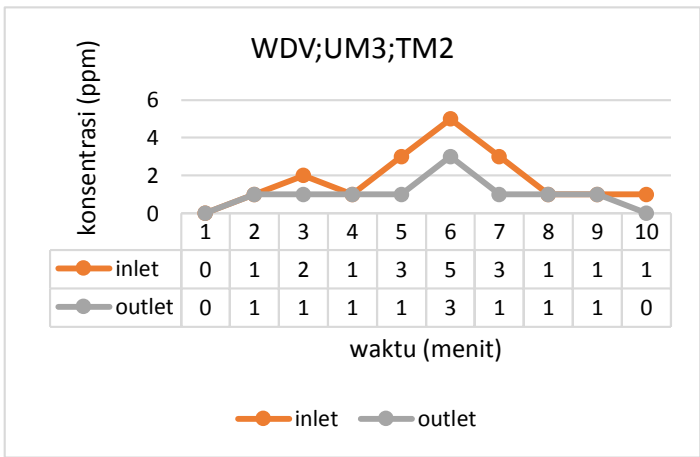
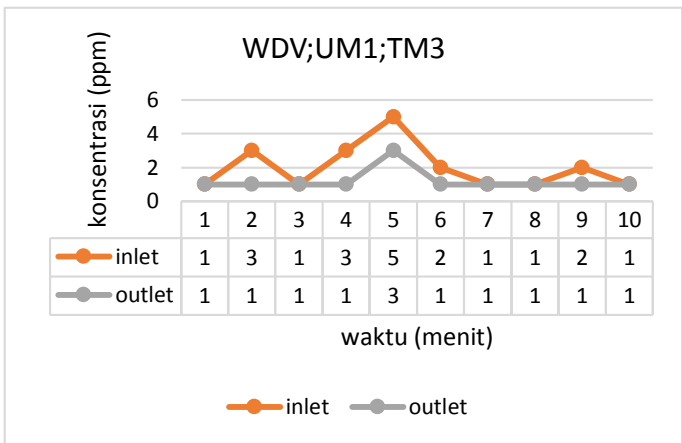
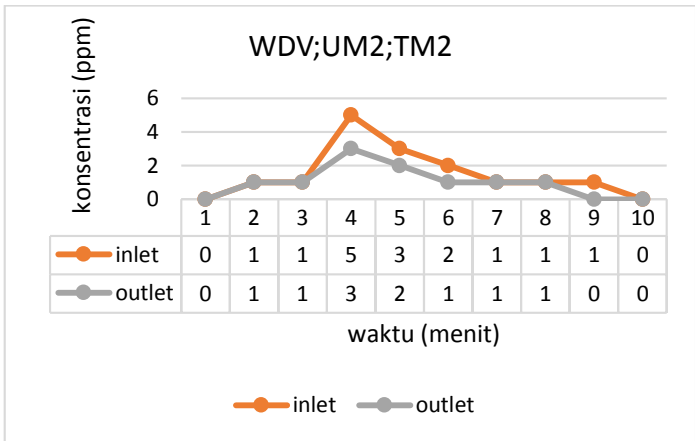


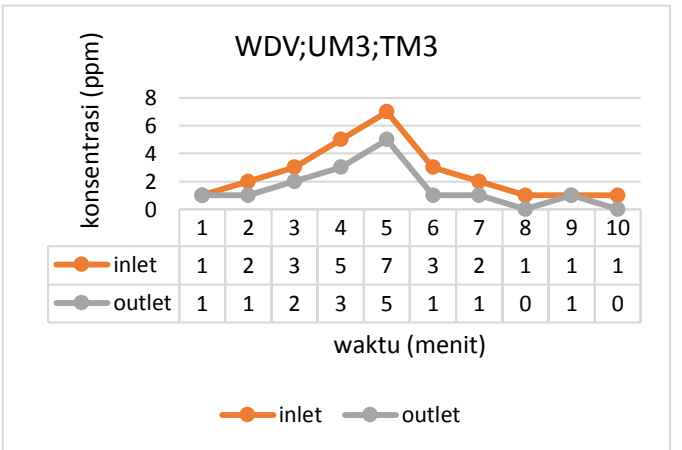
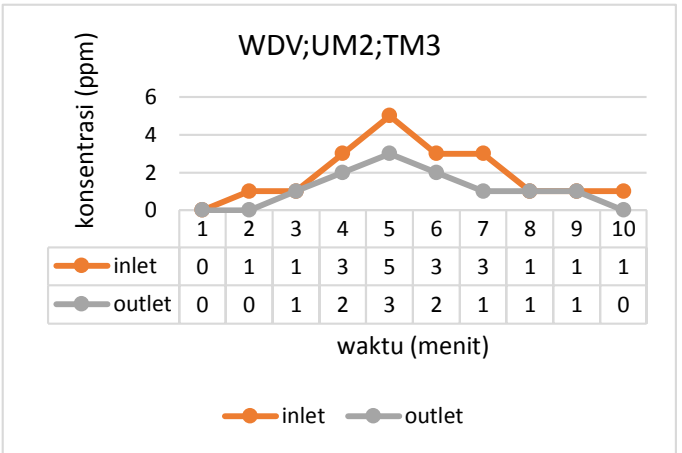
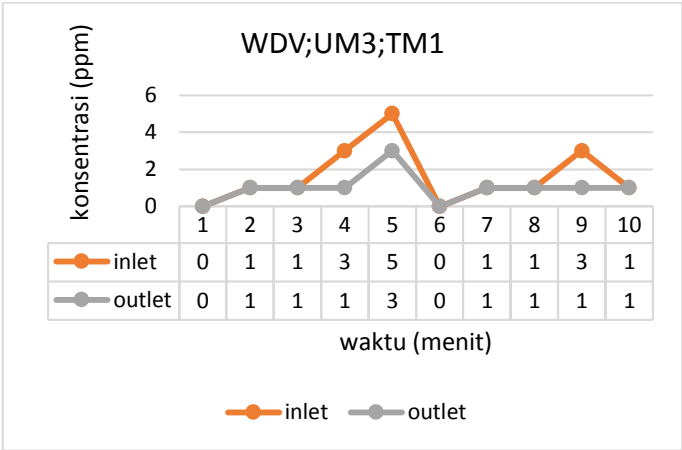


### 3. Pada *Double Venturi Vacuum*

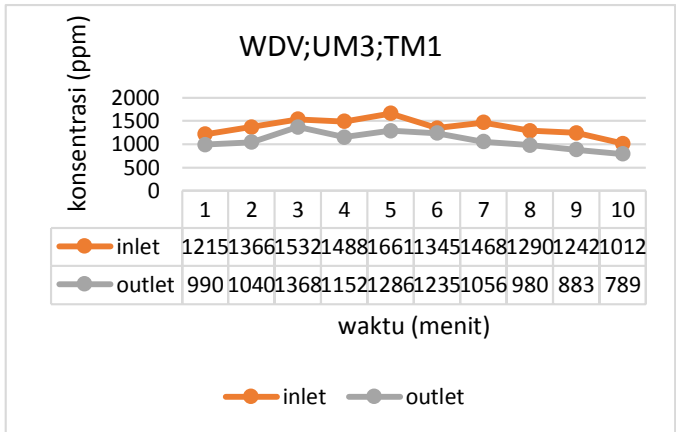
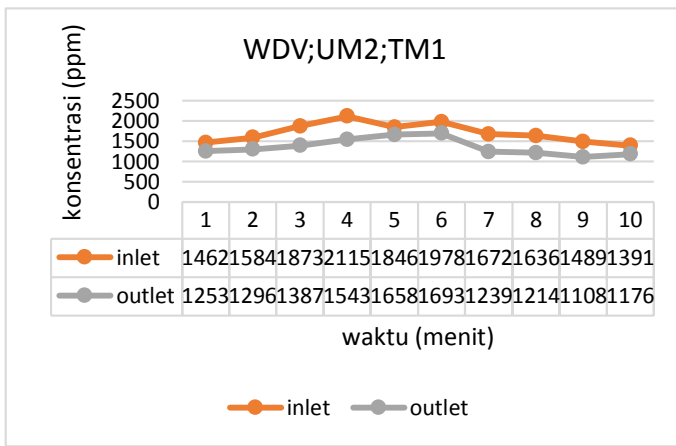
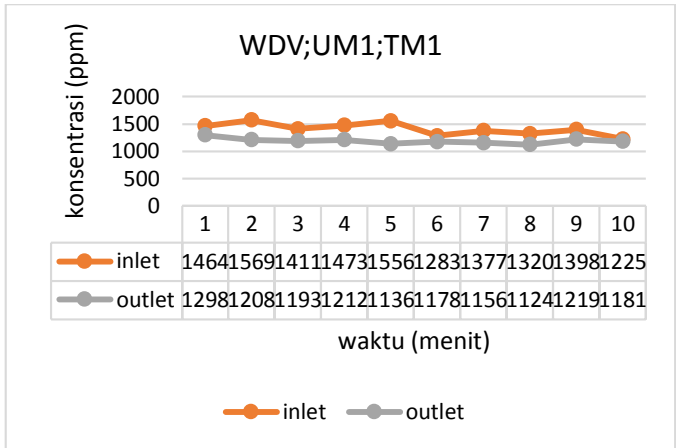
#### a. Grafik Nilai Emisi NO



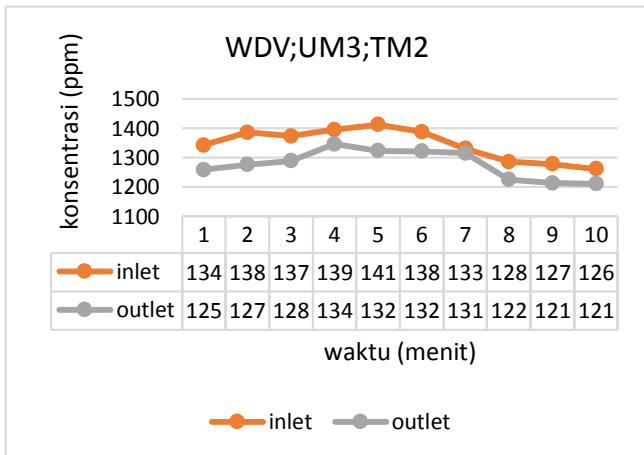
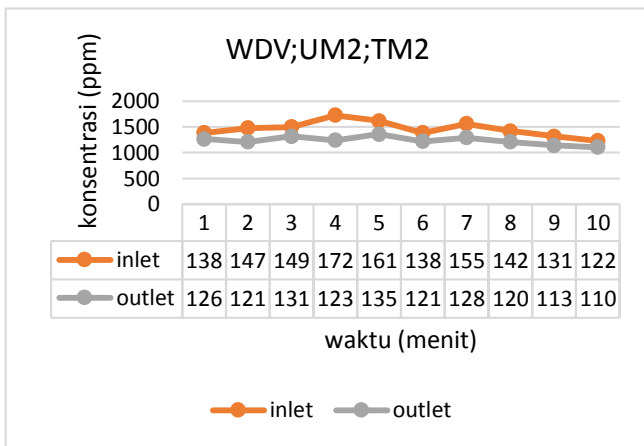
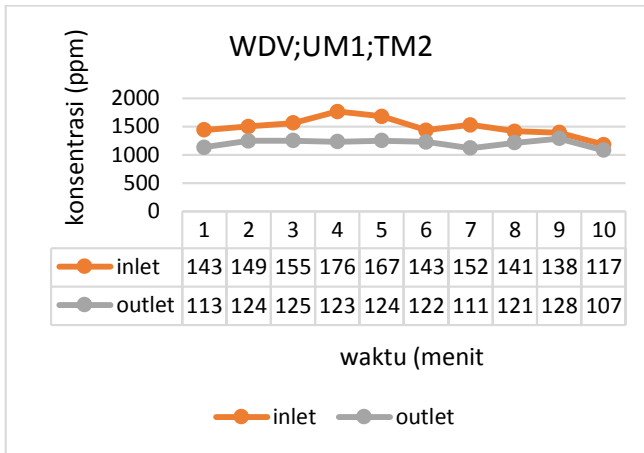


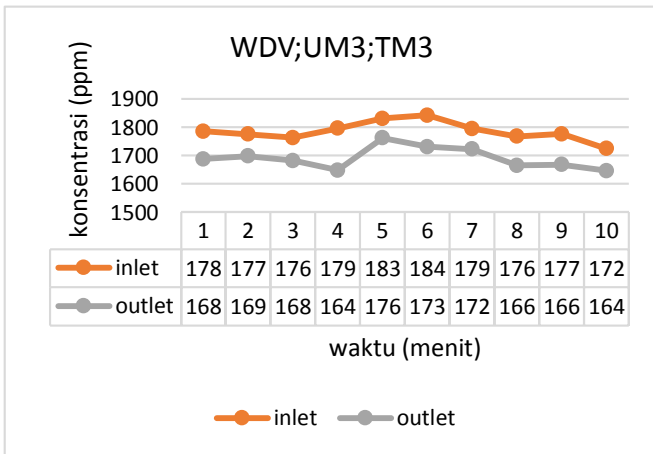
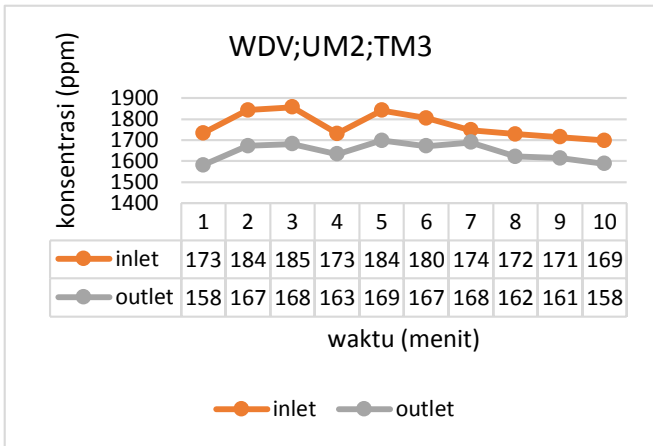
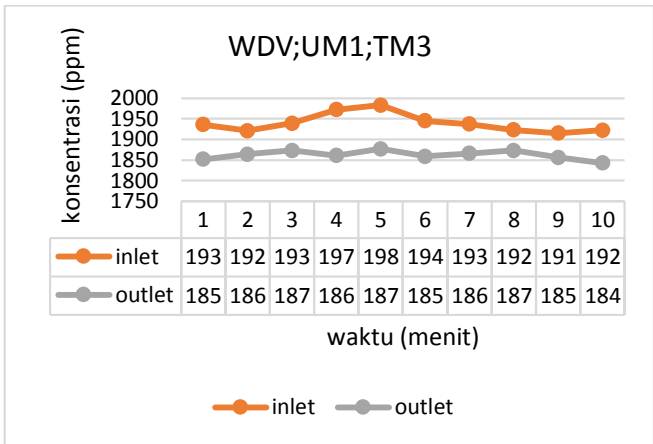


**b. Grafik Nilai Emisi CO**

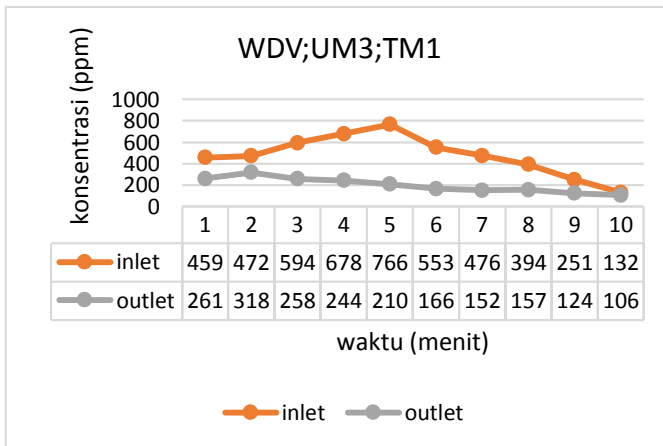
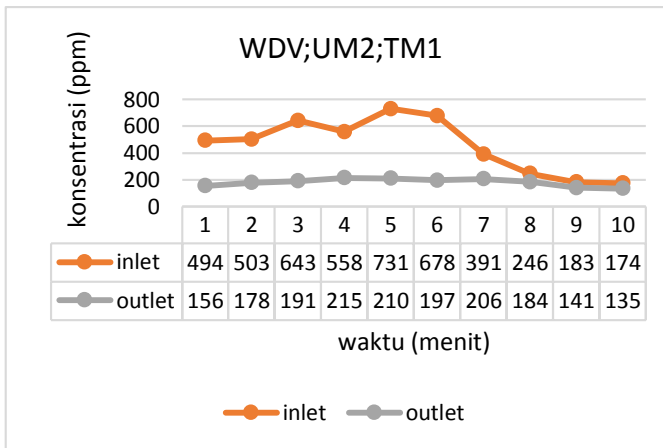
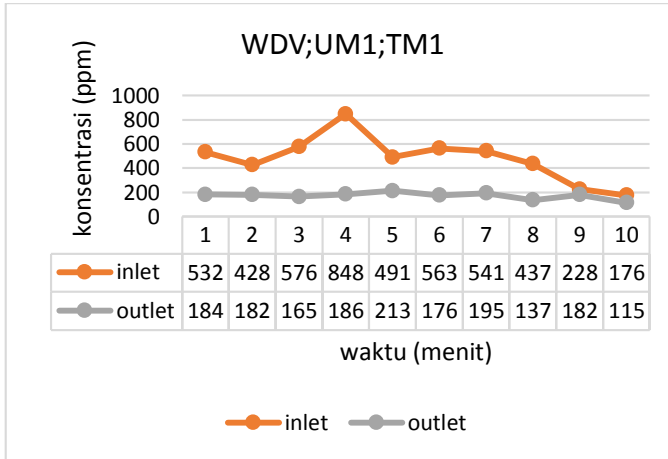


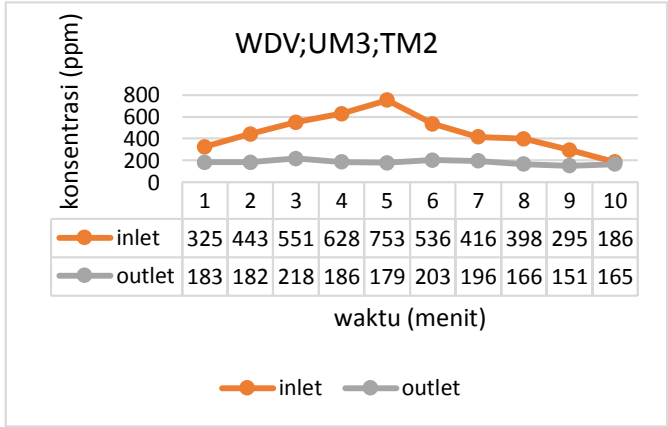
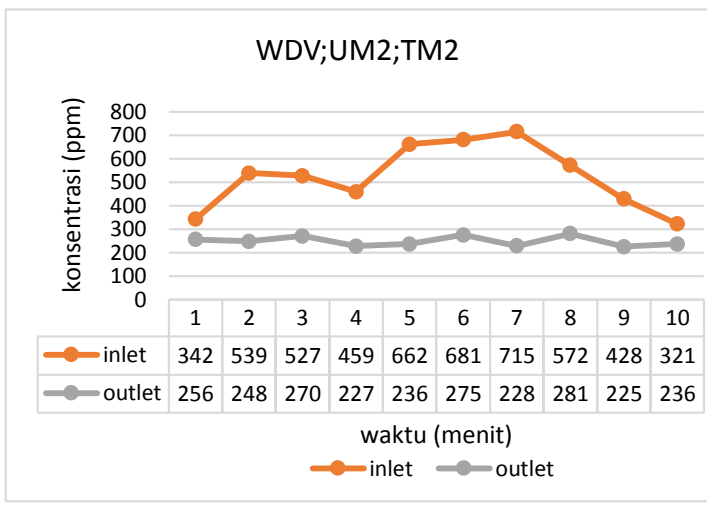
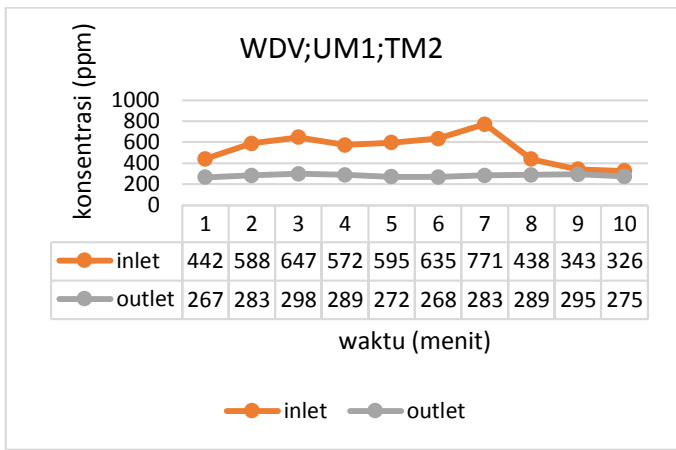


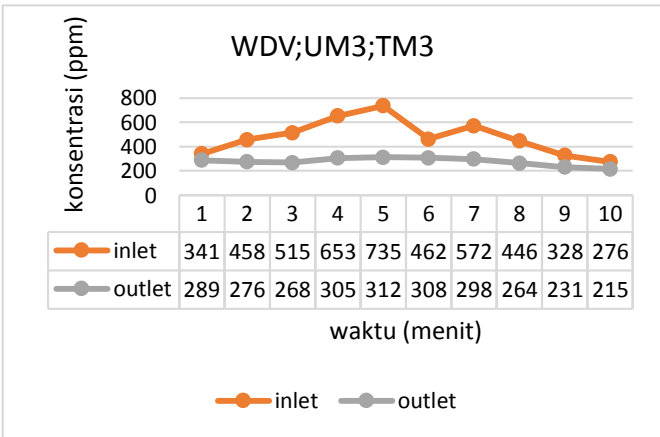
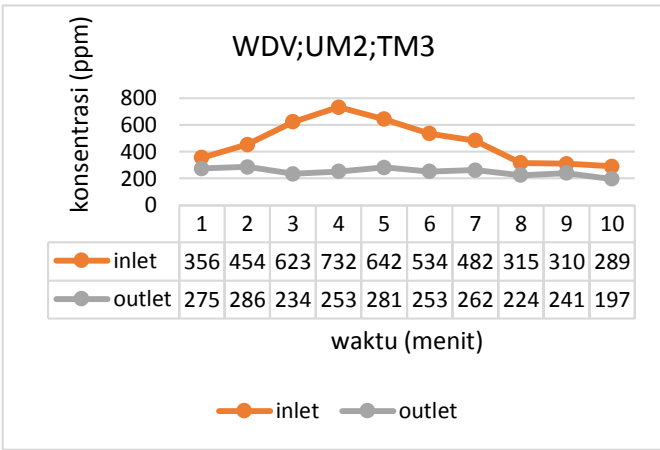
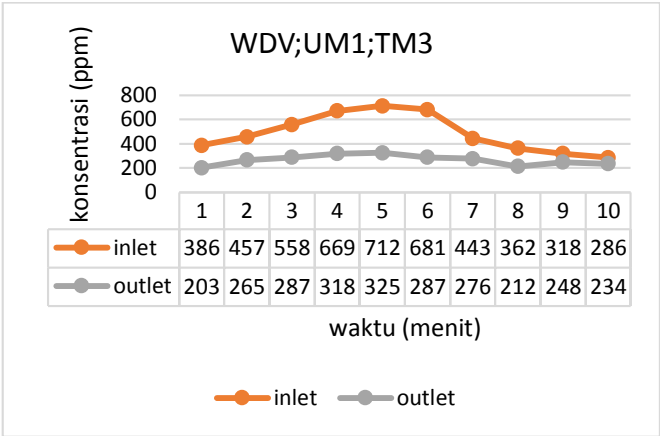




c. Grafik Nilai Emisi SO<sub>2</sub>





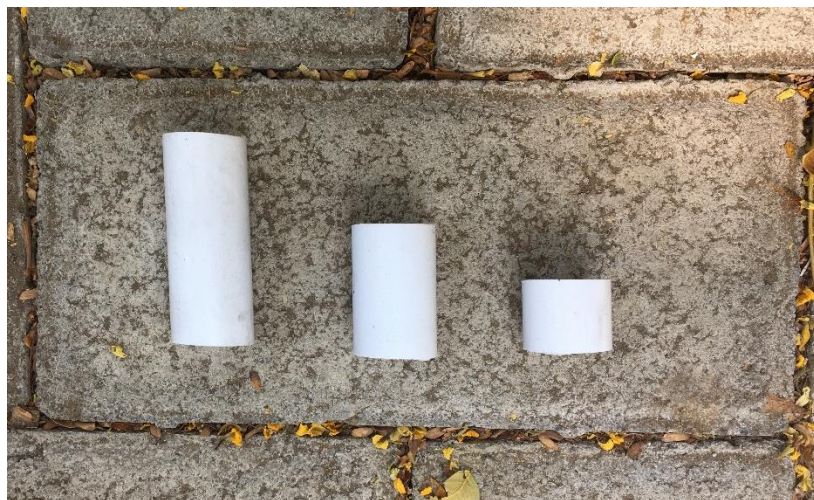


## LAMPIRAN 5

### Dokumentasi Pelaksanaan Penelitian



*Reaktor wet scrubber*



Media Filter ukuran 6 cm, 4 cm, 2 cm



*Panel thermocouple*



*Water pump*



*Gas analyzer sensonic type 1400*



Timbangan





*Gloves, purifying respirator, goggles*



Pelaksanaan dan pencatatan penelitian



**FORMULIR TESIS ULT-02**  
**Formulir Ringkasan dan Saran Dosen Pembimbing / Co-Pembimbing**  
**Ujian Lisan Tesis**

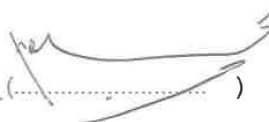
**Hari, tanggal** : Senin, 06 Januari 2020  
**Jam** : 07.30 - 09.30  
**Tempat** : R. Sidang Pasca  
**Judul Tesis** : Kajian Penurunan Emisi dengan Menggunakan Venturi Vacuum pada Sistem Three-Stage Filter Wet Scrubber  
**Nama Mahasiswa** : Yulanda Kurnia Pradani  
**NRP** : 03211750012007  
**Program Studi** : S-2 Teknik Lingkungan ITS  
**Bidang Studi** : Magister Teknik Lingkungan

No./Hal	Ringkasan dan Saran Dosen Pembimbing Tesis
	<p>- Cek buku . - Tambahkan latar belakang . - Tambahkan alasan mengapa tidak sesuai dg teori . - Reaksi: parameter dg air, teori absorpsi . - Analisa tda hasil, mengapa ? lihat literatur .</p> <p>f = 20/1 2020</p>

Dosen Pembimbing akan menyerahkan formulir KT-02 ke Sekretariat Pascasarjana  
Formulir ini harus dibawa mahasiswa pada saat asistensi dengan Dosen Pembimbing  
Formulir dikumpulkan bersama revisi buku setelah mendapat persetujuan Dosen Pembimbing

**Dosen Pembimbing**

Dr. Ir. Rachmat Boedisantoso, MT





**FORMULIR TESIS ULT-02**  
**Formulir Ringkasan dan Saran Dosen Pembimbing / Co-Pembimbing**  
**Ujian Lisan Tesis**

**Hari, tanggal** : Senin, 06 Januari 2020  
**Jam** : 07.30 - 09.30  
**Tempat** : R. Sidang Pasca  
**Judul Tesis** : Kajian Penurunan Emisi dengan Menggunakan Venturi Vacuum pada Sistem Three-Stage Filter Wet Scrubber  
**Nama Mahasiswa** : Yulanda Kumia Pradani  
**NRP** : 03211750012007  
**Program Studi** : S2 Teknik Lingkungan FTSP-ITS  
**Bidang Studi** : Magister Teknik Lingkungan

No./Hal	Ringkasan dan Saran Dosen Pembimbing Tesis
1.	Abstrak di awal → lebih baik → label, tujuan / maksud penelitian, metodologi / variabel, hasil kuantitatif.
2.	Catatan belakang di bagian mendasari penemuan masalah ← tujuan penelitian
3.	Leeri tentang venturi vacuum & scrubber di perbaiki & di tambah.
4.	Penin pembaharuan di kata ulang per variabel penelitian & perlakuan.
5	Kesimpulan di awal dg komprehensif.

Dosen Pembimbing akan menyerahkan formulir KT-02 ke Sekretariat Pascasarjana  
Formulir ini harus dibawa mahasiswa pada saat asistensi dengan Dosen Pembimbing  
Formulir dikumpulkan bersama revisi buku setelah mendapat persetujuan Dosen Pembimbing

Acc 20/01/2020  
Fadli 3 Jan

**Dosen Pembimbing**

Dr. Abdu Fadli Assomadi, SSI, MT

  
(.....)



**FORMULIR TESIS ULT-03**  
**Formulir Pertanyaan dan Saran Dosen Pengarah**  
**Ujian Lisan Tesis**

**Hari, tanggal** : Senin, 06 Januari 2020  
**Jam** : 07.30 - 09.30  
**Tempat** : R. Sidang Pasca  
**Judul Tesis** : Kajian Penurunan Emisi dengan Menggunakan Venturi Vacuum pada Sistem Three-Stage Filter Wet Scrubber  
**Nama Mahasiswa** : Yulanda Kumia Pradani  
**NRP** : 03211750012007  
**Program Studi** : S-2 Teknik Lingkungan ITS  
**Bidang Studi** : Magister Teknik Sanitasi Lingkungan

No./Hal	Pertanyaan dan Saran Dosen Pengarah Tesis
1)	latar belakang → alasan pemilihan masalah (hipotesis).
2)	tujuan penelitian → Mengetahui/Menentukan.
3)	jenis proses Reduksi NO <sub>2</sub> , CO, SO <sub>2</sub> dan SO <sub>3</sub> .

*[Signature]* 13/01-20

Formulir KT-03 diserahkan kepada Dosen Pembimbing setelah sesi Seminar Kemajuan selesai  
Dosen Pembimbing akan menyerahkan formulir KT-03 ke Sekretariat Pascasarjana  
Formulir ini harus dibawa mahasiswa pada saat asistensi dengan Dosen Pengarah  
Formulir dikumpulkan bersama revisi buku setelah mendapat persetujuan Dosen Pengarah dan Dosen Pembimbing

Dosen Pengarah : *[Signature]* (*[Signature]*)



**FORMULIR TESIS ULT-03**  
**Formulir Pertanyaan dan Saran Dosen Pengarah**  
**Ujian Lisan Tesis**

**Hari, tanggal** : Senin, 06 Januari 2020  
**Jam** : 07.30 - 09.30  
**Tempat** : R. Sidang Pasca  
**Judul Tesis** : Kajian Penurunan Emisi dengan Menggunakan Venturi Vacuum pada Sistem Three-Stage Filter Wet Scrubber  
**Nama Mahasiswa** : Yulanda Kumia Pradani  
**NRP** : 03211750012007  
**Program Studi** : S-2 Teknik Lingkungan ITS  
**Bidang Studi** : Magister Teknik Sanitasi Lingkungan

No./Hal	Pertanyaan dan Saran Dosen Pengarah Tesis
32	tidak ada penjelasan Hz. pemilihan ukuran media filter tidak ada penjelasan Hz. pemilihan tinggi media filter
35	tidak ada penjelasan Hz. waktu penelitian 10 menit
35	Gambar 4.1-4.9 → tidak jelas apa yg ditulis waktu inlet / outlet 6hr 4.2, 4.3, 4.5, 4.6, 4.8, 4.9 → waktunya ?? 6hr. 4.10 - selesai → Graph <del>or</del> garis → apakah selesai ? Saran → perlu didetailkan → faktor = apa kr. belum dilakukan dan perlu diteliti tidak ada penjelasan Hz. hasil percobaan. → literatur

Formulir KT-03 diserahkan kepada Dosen Pembimbing setelah sesi Seminar Kemajuan selesai  
Dosen Pembimbing akan menyerahkan formulir KT-03 ke Sekretariat Pascasarjana  
Formulir ini harus dibawa mahasiswa pada saat asistensi dengan Dosen Pengarah  
Formulir dikumpulkan bersama revisi buku setelah mendapat persetujuan Dosen Pengarah dan Dosen Pembimbing

Dosen Pengarah : Bienny Wijant T., ST.-MT. PhD. (.....)

17/01/2020

harus diteliti dan dibandingkan dg teori yg bertentangan  
- jelaskan di latar belakang → alasan pentingnya dilakukan penelitian ?



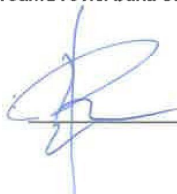
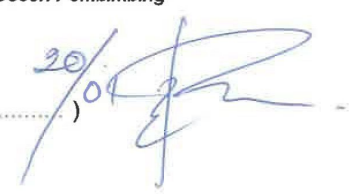
**FORMULIR TESIS ULT-03**  
**Formulir Pertanyaan dan Saran Dosen Pengarah**  
**Ujian Lisan Tesis**

**Hari, tanggal** : Senin, 06 Januari 2020  
**Jam** : 07.30 - 09.30  
**Tempat** : R. Sidang Pasca  
**Judul Tesis** : Kajian Penurunan Emisi dengan Menggunakan Venturi Vacuum pada Sistem Three-Stage Filter Wet Scrubber  
**Nama Mahasiswa** : Yulanda Kumia Pradani  
**NRP** : 03211750012007  
**Program Studi** : S-2 Teknik Lingkungan ITS  
**Bidang Studi** : Magister Teknik Sanitasi Lingkungan

No./Hal	Pertanyaan dan Saran Dosen Pengarah Tesis
<u>Bab 4</u>	hanya 'Hane' saja, tidak ada pembahasan / diskusi, tidak ada referensi (pembahasan tentang hane - hose peneliti lain)
<u>Intro</u>	Venturi ; SO, NO, CO; Variabel yg dipelajari tidak di intro duce & pendahuluan.
<u>Hal 2</u>	? / Analisis stakeholder ← cek lagi !
<u>gambar</u> <u>kemulaan &amp;</u> <u>hane</u>	Three-stage filter ? Apa yg menjadi dasar kemula berpengaruh / tidak jalan berpengaruh signifikan / tidak.
<u>Bab 2</u>	Bambar . x . x ← dibahas di text . "PEMBATAHASAN" ← fabel lain .

Formulir KT-03 diserahkan kepada Dosen Pembimbing setelah sesi Seminar Kemajuan selesai  
Dosen Pembimbing akan menyerahkan formulir KT-03 ke Sekretariat Pascasarjana  
Formulir ini harus dibawa mahasiswa pada saat asistensi dengan Dosen Pengarah  
Formulir dikumpulkan bersama revisi buku setelah mendapat persetujuan Dosen Pengarah dan Dosen Pembimbing

Dosen Pengarah

 ERVIN NURHAYATI  30/01/20

## BIOGRAFI PENULIS



Penulis bernama lengkap Yulanda Kurnia Pradani dan akrab dipanggil Yolanda atau Yola. Penulis lahir di Blora 31 Maret 1995 sebagai anak pertama dari Drs. Daeng Hadi Supanto dan Dra. Suci Rahayu. Penulis menempuh pendidikan di TK Tunas Rimba II pada Tahun 1999-2001 dan melanjutkan pendidikan ke SDN Sendangharjo I pada Tahun 2001-2007. Penulis melanjutkan pendidikan ke SMPN 1 Blora pada Tahun 2007-2010 dan melanjutkan pendidikan ke SMAN 1 Blora pada Tahun 2010-2013. Penulis melanjutkan pendidikan S1 pada Tahun 2013-2017 jurusan Teknik Lingkungan Fakultas Teknologi Mineral di Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Yogyakarta dengan judul skripsi “Kajian Pemanfaatan dan Teknik Konservasi Mata Air di Desa Giripurwo, Kecamatan Girimulyo, Kabupaten Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta”. Penulis melanjutkan pendidikan magister pada Tahun 2018-2020 di Departemen Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumihan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Penulis dapat dihubungi melalui e-mail [yulandakp@gmail.com](mailto:yulandakp@gmail.com).