



**TUGAS AKHIR - RE 184804**

# **KAJIAN PEMBAKARAN SAMPAH PLASTIK JENIS POLIPROPILENA (PP) MENGGUNAKAN INSINERATOR**

**ANNISA JASMINE RUDEND  
NRP. 0321164000002**

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

**DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN  
Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumihan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2020**



**TUGAS AKHIR - RE 184804**

**KAJIAN PEMBAKARAN SAMPAH PLASTIK  
JENIS POLIPROPILENA (PP) MENGGUNAKAN  
INSINERATOR**

**ANNISA JASMINE RUDEND  
NRP. 0321164000002**

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

**DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN  
Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumihan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2020**



**FINAL PROJECT - RE 184804**

**STUDY ON COMBUSTION OF  
POLYPROPYLENE (PP) PLASTIC WASTE WITH  
INCINERATOR**

**ANNISA JASMINE RUDEND  
NRP. 0321164000002**

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

**DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN  
Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumihan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2020**

## HALAMAN PENGESAHAN

### KAJIAN PEMBAKARAN SAMPAH PLASTIK JENIS POLIPROPILENA (PP) MENGGUNAKAN INSINERATOR

#### TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada  
Program Studi S-1 Departemen Teknik Lingkungan  
Fakultas Sipil, Perencanaan, dan Kebumihan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

**ANNISA JASMINE RUDEND**

NRP. 03211640000002

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir



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

NIP. 19600618 198803 1 002



**SURABAYA**

**7 Agustus 2020**

## **KAJIAN PEMBAKARAN SAMPAH PLASTIK JENIS POLIPROPILENA (PP) MENGGUNAKAN INSINERATOR**

Nama : Annisa Jasmine Rudend  
NRP : 03211640000002  
Departemen : Teknik Lingkungan, FTSPK, ITS  
Dosen Pembimbing : Prof. Ir. Joni Hermana, M.Sc.Es.,  
Ph. D

### **ABSTRAK**

Ketergantungan terhadap plastik dalam kehidupan sehari-hari, baik dalam kebutuhan rumah tangga maupun industri dapat menimbulkan permasalahan yaitu semakin meningkatnya jumlah sampah plastik. Peningkatan penggunaan plastik berdampak pada meningkatnya timbunan sampah pada tempat pemrosesan akhir (TPA). Salah satu jenis plastik yang paling sering digunakan dalam kegiatan industri maupun rumah tangga adalah *polypropylene* dengan massa jenis yang rendah, kuat, ketahanan terhadap bahan kimia, panas dan kelembaban, serta memiliki kestabilan dimensi yang baik. Salah satu alternatif metode pengolahan sampah yang dapat diterapkan adalah sistem termal yaitu insinerasi. Insinerasi adalah proses pengolahan sampah dengan sistem pembakaran yang mengubah material sampah menjadi abu, gas sisa hasil pembakaran, dan panas. Sistem insinerasi mampu mengurangi volume sampah hingga lebih dari 90% dalam waktu singkat serta menghasilkan energi panas yang dapat dimanfaatkan lebih lanjut. Insinerator adalah alat yang digunakan untuk menghancurkan sampah berupa pembakaran dengan kondisi terkendali. Kekurangan dari sistem insinerasi adalah dapat mengeluarkan emisi berbahaya. Salah satu faktor yang mempengaruhi proses pembakaran yang optimal dari insinerator adalah karakteristik sampah yang dibakar dan kandungan air dalam sampah. Kadar air yang tinggi dalam sampah dapat menyebabkan turunnya suhu pembakaran insinerator.

Pada kajian ini dilakukan perhitungan teoritis pembakaran sampah plastik jenis *polypropylene* menggunakan sistem *batch* dengan variabel kadar air dan jumlah sampah. Tujuan penelitian

ini adalah untuk menentukan pengaruh kadar air dan jumlah PP terhadap perubahan suhu dan emisi gas pada sistem insinerasi serta menghitung Destruction Removal Efficiency (DRE) sampah pada insinerator. Kajian ini dilakukan berdasarkan unit insinerator yang memiliki kemampuan membakar sampah domestik dengan kapasitas 10 kg/jam. Sampah yang digunakan adalah sampah plastik jenis PP, kain, kayu, kertas dan kardus. Parameter uji dalam penelitian ini yaitu suhu ruang bakar insinerator dan emisi gas buang insinerator berupa  $\text{SO}_3$  dan  $\text{Cl}_2$ . Kajian ini dilakukan berdasarkan: 1) Perhitungan termodinamika, 2) Perhitungan stoikiometri, 3) Perhitungan emisi polutan insinerator dan 4) Perhitungan DRE.

Hasil dari kajian ini adalah peningkatan jumlah PP dan penurunan kadar air sampah akan menyebabkan kenaikan pada temperatur pembakaran. Sedangkan peningkatan jumlah PP dan penurunan kadar air sampah menyebabkan kenaikan pada konsentrasi emisi gas buang  $\text{SO}_3$  dan  $\text{Cl}_2$ . Temperatur paling rendah adalah 1103,832 °C yang dihasilkan oleh jumlah PP 50% dan kadar air 5,13%, sedangkan temperatur paling tinggi adalah 1122,98 °C yang dihasilkan oleh jumlah PP 80% dan kadar air 2,148%. Konsentrasi emisi gas buang paling rendah adalah 27,895 ppm  $\text{SO}_3$  dan 63,137 ppm  $\text{Cl}_2$  yang dihasilkan oleh jumlah PP 50% dan kadar air 7,58%, sedangkan konsentrasi paling tinggi adalah 32,564 ppm  $\text{SO}_3$  dan 73,704 ppm  $\text{Cl}_2$  yang dihasilkan oleh jumlah PP 80% dan kadar air 2,148%. Nilai DRE paling tinggi adalah 96% dan paling rendah adalah 94,9%.

**Kata kunci :** insinerator, jumlah sampah, kadar air, polipropilena, *Destruction Removal Efficiency*.

## **STUDY ON COMBUSTION OF POLYPROPYLENE (PP) PLASTIC WASTE WITH INCINERATOR**

Name : Annisa Jasmine Rudend  
NRP : 0321164000002  
Study Program : Environmental Engineering  
Supervisor : Prof. Ir. Joni Hermana, M.Sc.Es.,  
Ph. D

### **ABSTRACT**

Dependence on plastic in everyday life, whether in household or industrial needs can cause problems namely the increasing amount of plastics. Enhancement use of plastics affect on increased hill of waste in a landfill (TPA). One of the most common plastic types of industries and household activities are polypropylene (PP) because it has good physical properties with low mass, firm, resistance to chemicals, heat and humidity, as well as a good dimension stability. One of the alternatives method of waste treatment that can be applied is Thermal System that is Incineration. Incineration is a waste processing with a combustion system which changes the waste material into ash, combustion gasses, and heat. Incineration system able to reduce the volume of waste up to 90% in a short period of time also produced heat energy that can be utilized further. Incinerator is a unit used to destroy waste in the form of combustion under controlled conditions. The drawback of the incineration system is that it can emit harmful emissions.. One of the factors affecting the optimal combustion process of the incinerator are the characteristic of the burning waste and the water content of the waste. High water content in the waste can cause the incinerator temperature to drop.

This research will be carried out burning polypropylene type plastic waste using a batch system with variable water content and amount of waste. The purpose of this study is to determine the effect of water content and the amount of waste on changes in temperature and gas emissions in the incineration system and calculate the efficiency of waste removal in incinerators. This research will be based on an incinerator with the ability to burn

domestic waste with a capacity of 10 kg/hour. Waste that will be used is PP type plastic waste, cloth, wood, cupboard and paper. Test parameters in this study are the incinerator combustion chamber temperature and incinerator flue gas emissions in the form of  $\text{SO}_3$  and  $\text{Cl}_2$ . This study is done based on: 1) Thermodynamic calculation, 2) Stoichiometric calculation, 3) Pollutant emission calculations, and 4) DRE calculation.

The result from this study is increasing amount of PP and decreasing waste moisture content results in increase of combustion temperature. While increasing amount of PP and decreasing waste moisture content results in increase of  $\text{SO}_3$  and  $\text{Cl}_2$  flue gas emission concentration. The lowest temperature is 1103,832 °C which is resulted by 50% PP and moisture content of 5,13%, the highest temperature is 1122,98 °C which is resulted by 80% PP and moisture content of 2,148%. The lowest flue gas emission concentration is 27,895 ppm  $\text{SO}_3$  and 63,137 ppm  $\text{Cl}_2$  which is resulted by 50% PP and moisture content of 7,58%, the highest concentration is 32,564 ppm  $\text{SO}_3$  and 73,704 ppm  $\text{Cl}_2$  which is resulted by 80% PP and moisture content of 2,148%. The highest number of DRE is 96% while the lowest is 94,9%.

**Keywords :** incinerator, waste amount, moisture content, polypropylene, Destruction Removal Efficiency.



## **KATA PENGANTAR**

Puji syukur kehadiran Allah SWT karena berkat rahmat dan karunia-Nya, Laporan Tugas Akhir yang berjudul “Kajian Pembakaran Sampah Plastik Jenis Polipropilena (PP) Menggunakan Insinerator” dapat diselesaikan. Pada kesempatan yang baik ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan semangat, bimbingan dan nasehat dalam penyusunan dan penulisan proposal tugas akhir terutama kepada:

1. Bapak Prof. Joni Hermana M.Sc.Es., PhD selaku dosen pembimbing tugas akhir yang telah membimbing, memberi masukan, dan arahan.
2. Bapak Dr. Abdu Fadli Assomadi, S.Si, MT, Bapak Dr. Eng. Arie Dipareza Syafei, ST, MEPM, dan Bapak Alfian Purnomo ST. MT. sebagai dosen pengarah yang telah memberikan saran dan masukan.
3. Teman-teman bimbingan TA, PSMITS, dan Environmate yang selalu memberi dorongan dan mengingatkan satu sama lain.
4. Aji Surya Saputra, Ari Krisna Putra, dan Rahmah Nabilatun Nisa' yang telah membantu penyusunan tugas akhir ini secara teknis
5. Orang tua, saudara, dan Alfian Wahyu Ramadhan yang telah menjadi motivasi dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan baik, dan memberikan dorongan, serta tak lupa selalu mendoakan dari kejauhan.

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

Surabaya, 7 Agustus 2020

Penulis

**“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”**

## DAFTAR ISI

ABSTRAK.....	i
ABSTRACT .....	iii
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI .....	vii
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan.....	2
1.4 Ruang Lingkup .....	2
1.5 Manfaat.....	3
BAB 2 STUDI LITERATUR.....	5
2.1 Plastik .....	5
2.2 Plastik <i>Polypropylene</i> (PP).....	8
2.2.1 Sifat Fisik dan Kimia Polypropylene (PP).....	9
2.2.2 Plastik Sebagai Sumber Energi.....	9
2.3 Pengolahan Sampah Secara Termal .....	10
2.4 Insinerator .....	12
2.4.1 Prinsip Kerja Insinerator .....	12
2.4.2 Ruang Bakar Insinerator.....	13
2.4.3 <i>Destruction Removal Efficiency (DRE)</i> .....	14
2.4.4 Emisi Gas Pada Insinerator .....	15
2.4.5 Kelemahan Insinerator .....	15
2.5 Pembakaran .....	16
2.5.1 Faktor yang Mempengaruhi Pembakaran Sempurna .....	18
2.5.2 Pembakaran <i>Polypropylene</i> .....	21

2.6 Perhitungan teoritis pada Insinerasi Sampah .....	21
2.7 Penelitian Terdahulu.....	25
<b>BAB 3 METODE PENELITIAN .....</b>	<b>27</b>
3.1 Kerangka Studi .....	27
3.2 Metode Studi.....	29
3.2.1 Kajian Pustaka.....	29
3.2.2 Studi Kasus .....	29
3.3 Sistematika Penulisan .....	30
3.4 Bagian-Bagian Insinerator .....	32
<b>BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>35</b>
5.1 Penentuan Variabel.....	35
4.2 <i>Proximate</i> dan <i>Ultimate Analysis</i> Sampah yang Diinsinerasi.....	35
4.3 Penyusunan Reaksi Stoikiometrik.....	39
4.4 Estimasi Suhu dan Emisi Pembakaran .....	40
4.5 Destruction Removal Efficiency .....	46
4.6 Pengaruh Jumlah PP Terhadap Emisi dan Temperatur Insinerator.....	49
4.6.1 Pengaruh Jumlah PP Terhadap Temperatur Insinerator .....	49
4.6.2 Pengaruh Jumlah PP Terhadap Emisi Gas Buang Insinerator .....	51
4.7 Pengaruh Kadar Air Sampah Terhadap Emisi dan Temperatur Insinerator .....	54
4.7.1 Pengaruh Kadar Air Sampah Terhadap Temperatur Insinerator .....	54
4.7.2 Pengaruh Kadar Air Sampah Terhadap Emisi Gas Buang Insinerator .....	56
<b>BAB 5 PENUTUP .....</b>	<b>61</b>
5.1 Kesimpulan.....	61
5.2 Saran .....	62

DAFTAR PUSTAKA .....	63
LAMPIRAN .....	71
I. Perhitungan Proximate dan Ultimate Analysis tiap variasi.....	71
II. Perhitungan Destruction Removal Efficiency tiap variasi..	79
III. Perhitungan Reaksi Stoikiometrik tiap variasi.....	83
IV. Perhitungan Temperatur dari variasi PP dan Kadar Air Sampah .....	87
V. Perhitungan Emisi Gas Buang dari Variasi PP dan Kadar Air Sampah.....	90
VI. Perhitungan Emisi Pembakaran Hanya Sampah PP .....	92
BIOGRAFI PENULIS .....	99

**“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”**

## DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Proximate Analysis dan Nilai Kalor Plastik.....	10
Tabel 3. 1 Nama dan fungsi bagian pada Insinerator.....	32
Tabel 4. 1 Variasi Sampah yang akan diinsinerasi.....	35
Tabel 4. 2 Proximate Analysis Komponen Sampah .....	35
Tabel 4. 3 Variasi Kadar Air Sampah .....	36
Tabel 4. 4 Ultimate Analysis Sampah .....	36
Tabel 4. 5 Massa Dry Basis.....	37
Tabel 4. 6 Total Massa Komponen .....	38
Tabel 4. 7 Berat Atom Komposisi Sampah .....	38
Tabel 4. 8 Konstanta reaksi pembakaran.....	39
Tabel 4. 9 Tekanan Parsial Gas Buang Awal.....	41
Tabel 4. 10 Tekanan Parsial Gas Buang Koreksi .....	42
Tabel 4. 11 Hasil Koreksi Tekanan Parsial Gas Buang .....	43
Tabel 4. 12 Komposisi Gas Buang .....	44
Tabel 4. 13 Kapasitas Panas Tiap Komponen .....	44
Tabel 4. 14 Komposisi Gas Buang Akhir.....	46
Tabel 4. 15 Hasil Perhitungan DRE .....	47
Tabel 4. 16 Hasil Perhitungan Temperatur dengan Variasi Jumlah PP.....	49
Tabel 4. 17 Hasil Perhitungan Emisi Gas Buang dengan Variasi Jumlah PP .....	51
Tabel 4. 18 Hasil Perhitungan Temperatur dengan Variasi Kadar Air Sampah.....	54
Tabel 4. 19 Hasil Perhitungan Emisi Gas Buang pada Variasi Kadar Air Sampah.....	57

**“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”**



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Simbol Jenis-Jenis Plastik.....	7
Gambar 2.2 Simbol Plastik PP .....	8
Gambar 2.3 PP pada Produk Sehari-hari.....	8
Gambar 2.4 Struktur Kimia Polypropylene .....	9
Gambar 2.5 Proses Insinerasi.....	13
Gambar 3.1 Kerangka Kajian Pustaka dengan Studi Kasus.....	28
Gambar 4.1 Desain Insinerator.....	32
Gambar4.2 Grafik Pengaruh Variasi jumlah PP dan kadar air sampah terhadap DRE.....	48
Gambar4.3 Grafik Pengaruh Jumlah PP terhadap Temperatur Insinerator .....	50
Gambar4.4 Grafik Pengaruh Jumlah PP terhadap Emisi Gas Buang Insinerator .....	52
Gambar4.5 Grafik Pengaruh Kadar Air Sampah terhadap Temperatur Insinerator .....	55
Gambar4.6 Grafik Pengaruh Kadar Air Sampah terhadap Emisi gas buang Insinerator .....	58



## BAB 1

### PENDAHULUAN

#### 1.1 Latar Belakang

Kemudahan teknologi menimbulkan dampak negatif yang tak kalah besar, yaitu penggunaan plastik. Keunggulan plastik dibandingkan dengan bahan material lain adalah kuat, ringan, murah, tidak mudah mengalami korosi, dan mudah dibentuk (Syamsiro dkk, 2016). Indonesia mendapatkan ranking ke-2 sebagai penghasil sampah plastik terbesar di dunia dengan jumlah sampah plastik di Indonesia mencapai 85000 ton per tahun (Puspita, 2018). Menurut *World Economic Forum* (2018), 16 % sampah plastik akan didaur ulang namun hanya 2% sampah plastik yang bisa didaur ulang secara efektif, 14% sampah plastik akan dibakar, 40% terkubur dalam tempat pemrosesan akhir (TPA) dan 30% berakhir mencemari lingkungan.

Salah satu jenis plastik yang sering digunakan pada kehidupan sehari-hari adalah plastik jenis *polypropylene* (PP). PP adalah bahan material yang sering digunakan karena sifatnya yaitu tahan air, tahan terhadap bahan kimia, tahan terhadap temperatur tinggi, dan mudah dibentuk. Namun karena jumlahnya semakin meningkat serta sifatnya yang sulit terurai, maka diperlukan perhatian lebih dalam pembuangannya (Maddah, 2016). Polypropylene merupakan plastik nomor 2 yang paling sering digunakan setelah Polyethylene dan paling sering digunakan pada kemasan produk. Pada tahun 2019, penjualan PP mencapai 126,03 milyar dollar sehingga perlu perhatian dalam pembuangannya (Globenewswire, 2020)

Salah satu metode pengolahan sampah adalah dengan cara pembakaran (insinerasi). Insinerasi digunakan karena adanya keterbatasan lahan pada tempat pembuangan akhir. Sistem pembakaran insinerasi memiliki kelemahan yaitu kebutuhan energi sebagai pemantik pembakar sampah (*burner*) yang sangat besar. Sistem insinerasi mempunyai keunggulan yang mampu mengurangi volume sampah sebesar 90% lebih dengan waktu yang relatif singkat, serta dapat mendetoksifikasi bahan pathogen hingga 100%. Selain itu, sistem insinerasi memiliki panas hasil

pembakaran yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi (Chang dkk., 2007).

Menurut Naryono dkk (2013), Permasalahan yang dihadapi pada pengolahan termal sampah adalah tingginya kadar air, yang dapat mencapai 70% massa. Kadar air sampah yang tinggi ini dapat menyebabkan turunnya suhu nyala pembakaran pada insinerator. Kinerja sistem pengolahan termal berupa kecepatan pembakaran, suhu dan komposisi gas buang dipengaruhi oleh beberapa parameter, diantaranya yaitu: komposisi dan sifat fisik sampah seperti kadar air sampah sehingga perlu dilakukan adanya kajian terhadap pembakaran sampah pada insinerator.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah disebutkan, maka rumusan masalah yang dikaji dalam penelitian ini antara lain:

1. Bagaimana pengaruh jumlah plastik PP dan kadar air sampah terhadap temperatur yang dihasilkan pada insinerator sistem *batch*?
2. Bagaimana pengaruh jumlah plastik PP dan kadar air sampah terhadap emisi gas buang yang dihasilkan pada insinerator sistem *batch*?
3. Berapa *Destruction Removal Efficiency* (DRE) sampah pada insinerator?

## 1.3 Tujuan

Tujuan dari studi Pustaka ini yaitu:

1. Menentukan pengaruh jumlah plastik PP dan kadar air sampah terhadap temperatur yang dihasilkan pada insinerator sistem *batch*
2. Menentukan pengaruh jumlah plastik PP dan kadar air sampah terhadap emisi gas buang yang dihasilkan pada insinerator sistem *batch*
3. Menghitung *Destruction Removal Efficiency* (DRE) sampah pada insinerator

## 1.4 Ruang Lingkup

1. Unit Insinerator yang digunakan adalah insinerator dengan kapasitas 10 kg/jam

2. Bahan uji penelitian ini menggunakan jenis sampah PP, kain, kayu, kardus dan kertas.
3. Parameter uji pada penelitian ini yaitu temperatur ruang bakar insinerator dan emisi gas berupa  $SO_3$  dan  $Cl_2$
4. Sistem pembakaran sampah pada insinerator dilakukan secara *batch*

### **1.5 Manfaat**

Manfaat studi literatur tugas akhir ini yaitu:

1. Menghasilkan informasi-informasi dalam pengolahan sampah plastik PP dengan insinerator
2. Memberikan informasi baru terhadap pengolahan sampah yang efektif dan efisien
3. Menjadi bahan acuan dalam menentukan jenis sampah plastik dalam sistem insinerasi dan dapat menjadi pertimbangan dalam pengembangan teknologi insinerator selanjutnya

**“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”**

## BAB 2

### STUDI LITERATUR

#### 2.1 Plastik

Sebagian besar monomer yang digunakan untuk membuat plastik seperti etilena dan propilena merupakan turunan dari hidrokarbon fosil. Umumnya plastik bukan merupakan bahan *biodegradable*. Sebagai hasilnya, zat plastik tidak terurai, tetapi terakumulasi dalam *landfill* atau di lingkungan. Satu-satunya cara untuk menghilangkan plastik secara permanen adalah dengan pengolahan secara *thermal*, seperti pembakaran dan pirolisis (Geyer dkk., 2017)

Menurut Syarief (1989), jenis plastik dibagi menjadi dua berdasarkan sifatnya terhadap perubahan suhu yaitu:

1. Termoplastik: yaitu jenis plastik yang dapat meleleh pada suhu tertentu, memiliki sifat *reversible* pada sifat aslinya, dan melekat sesuai perubahan suhu. Plastik jenis ini akan kembali mengeras apabila didinginkan. Jenis plastik yang termasuk termoplastik adalah: PE, PP, PS, *acrylonitrile butadiene styrene* (ABS), *styrene acrylonitrile resin* (SAN), nylon, PET, *polyacetal* (POM), dan lain-lain.
2. Termoset: yaitu jenis plastik yang tidak dapat mengikuti perubahan suhu (*irreversible*). Plastik jenis ini apabila telah mengalami kondisi tertentu, maka tidak dapat dicetak kembali karena polimernya berbentuk jaringan tiga dimensi. Jenis plastik termoset tidak dapat dilunakkan kembali setelah melalui proses pengerasan. Proses pemanasan yang tinggi akan membentuk arang. Jenisnya antara lain: *polyurethane* (PU), *urea formaldehyde* (UF), *melamine ormaldehyde* (MF), *polyester*, epoksi, dan lain-lain.

Jenis plastik berdasarkan penggunaannya terbagi menjadi 2, yaitu:

1. Plastik Komoditas  
Jenis plastik komoditas memiliki sifat mekanik yang tidak terlalu bagus serta tidak tahan terhadap panas. Contoh dari plastik jenis komoditas adalah: Polietilena (PE),

Polistirene (PS), Akrilonitil Butadiena Stiren (ABS), Polimetil Metakrilat (PMMA), dan Stirena Akrilonitil (SAN).

2. Plastik Teknik

Memiliki sifat mekanik yang bagus dan tahan terhadap panas dengan temperatur operasi diatas 100 °C. Contoh plastik teknik adalah: Poliamid (PA), dan Polikarbonat (PC). Aplikasinya ada pada komponen otomotif dan elektronik.

Menurut Tchobanoglous, Theisen dan Vigil, (1993) jenis plastik dibagi menjadi 7 (tujuh) macam yaitu;

1. *Polyethylene Terephthalate* (PET)

PET memiliki kekuatan mekanis layaknya besi, tapi dibawah banyak beban, lembaran plastik PET akan terulur lebih Panjang daripada besi sebelum akhirnya rusak. Biasanya digunakan dalam: botol air mineral, botol obat, botol kosmetik, dan lain-lain.

2. High Density Polyethylene (HDPE)

Adalah plastik dengan ketipisan paling tinggi dan paling kuat. Digunakan untuk pallet, drum, jerigen, *bulk container*, dan lain-lain.

3. *Polyvinyl Chloride* (PVC)

Merupakan hasil polimerisasi dari *vinyl chloride monomer* (VCM). PVC memiliki ketahanan yang bagus terhadap minyak dan lemak, memiliki permukaan yang jernih. PVC dapat menjadi lembek dalam temperatur yang rendah (80–95°C). Penggunaannya adalah: pipa air, pipa bangunan, dan lain-lain.

4. *Low Density Polyethylene* (LDPE)

Mudah dicetak dalam bentuk selang serta mudah dibentuk. Lembaran plastik LDPE dapat diberi pewarna dengan mudah. Biasanya digunakan untuk berbagai macam kresek makanan.

5. *Polypropylene* (PP)

Memiliki massa jenis paling rendah dan titik leleh paling tinggi dari semua jenis termoplastik serta memiliki harga yang relatif murah. Plastik serbaguna



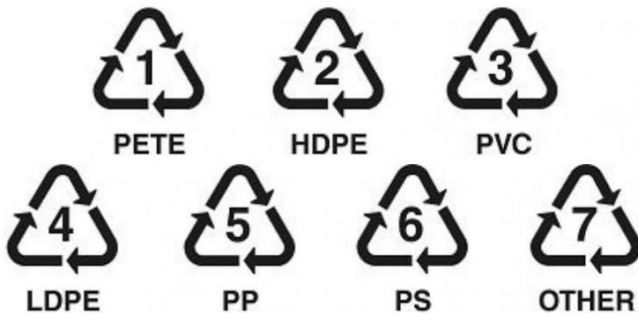
ini dapat diproses menjadi berbagai macam kemasan makanan dalam bentuk fleksibel maupun kaku. Penggunaannya adalah: gelas plastik, mainan anak, wadah mentega, dan lain-lain.

6. *Polystyrene* (PS)

Memiliki transparansi tinggi dan bersifat kaku. Bahan *styrene* dihindari untuk kemasan makanan, dikarenakan dapat masuk ke makanan dan berbahaya untuk otak dan syaraf manusia. Contoh penggunaannya adalah: tempat makan sekali pakai, tempat telur, dan lain-lain.

7. *Other*

Terbuat dari selain enam golongan diatas, atau terbuat dari lebih dari satu jenis resin dan digunakan dalam bermacam-macam lapisan. Contohnya adalah: botol susu bayi, sikat gigi, computer, mainan *lego*, dan lain-lain. simbol masing masing plastik dapat dilihat pada gambar



Gambar 2. 1 Simbol Jenis-Jenis Plastik

Sumber: Howard dkk, 2020

## 2.2 Plastik *Polypropylene* (PP)

Menurut Tchobanoglous, Theisen dan Vigil, (1993), *polypropylene* adalah plastik yang memiliki massa jenis paling rendah dan titik leleh paling tinggi dari semua jenis termoplastik serta memiliki harga yang relatif murah. Simbol plastik PP dapat dilihat pada gambar 2.2



Gambar 2. 2 Simbol Plastik PP

Sumber: Lucas, 2018

. Plastik serbaguna ini dapat diproses menjadi berbagai macam kemasan makanan dalam bentuk fleksibel maupun kaku. Penggunaannya adalah: container plastik, kursi plastik, alat makan plastik, karung plastik dan lain-lain. Produk sehari-hari yang terbuat dari PP ada pada Gambar 2.3

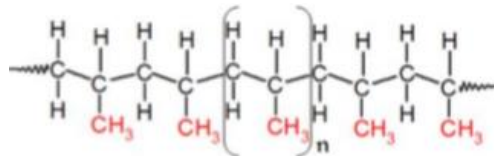


Gambar 2. 3 PP pada Produk Sehari-hari

Sumber: Omnexus, 2018

### 2.2.1 Sifat Fisik dan Kimia Polypropylene (PP)

Menurut Maddah (2016), massa jenis PP adalah antara 0,91 – 0,94 g/cm<sup>3</sup>. PP memiliki titik leleh yaitu 160-166 °C. Memiliki sifat sangat mirip dengan *polyethylene* (PE), namun PP lebih kuat dan ringan dengan daya tembus uap yang rendah, ketahanan yang baik terhadap lemak, stabil terhadap suhu tinggi dan cukup mengkilap. Monomer PP diperoleh dengan pemecahan secara termal *naphtha* (distalasi minyak kasar) etilen, *propylene* dan *homologues* yang lebih tinggi dipisahkan dengan distilasi pada temperatur rendah. Dengan menggunakan katalis Natta-Ziegler, polipropilen dapat diperoleh dari propilen. PP adalah bahan plastik yang dipakai pada kemasan makanan ringan, sedotan, kantong obat, penutup, dan lain-lain. Struktur kimia PP dapat dilihat pada gambar 2.4



Gambar 2. 4 Struktur Kimia *Polypropylene*

Sumber: Maddah , 2016

### 2.2.2 Plastik Sebagai Sumber Energi

Limbah plastik memiliki nilai kalor sebesar 33-39 MJ/kg, dengan kadar abu antara 2 - 4,3 % serta kadar air sebesar 10% dari beratnya. Spesifikasi ini menunjukkan bahwa sampah kota yang pembakarannya menggunakan sampah plastik akan menghasilkan uap panas. Data *Proximate analysis* dan *calorific value* plastik ada pada Tabel 2.1

Tabel 2. 1 *Proximate Analysis* dan Nilai Kalor Plastik

Plastik	Kadar Volatile Matter (% Berat)	Kadar Fixed Carbon (% berat)	Ash Content (% Berat)	Nilai Kalor (MJ/kg)
HDPE	100	0	0	46,4
LDPE	100	0	0	46,6
PP	100	0	0	46,4
PS	99,8	0,2	0	42,1
PVC	94,8	4,8	0,4	22,8

Sumber: Arsad dkk., 2006

### 2.3 Pengolahan Sampah Secara Termal

Secara prinsip, yang dimaksud dengan teknologi pembakaran sampah adalah mengkonversi sampah menjadi energi dengan menggunakan proses termal. Energi yang dihasilkan tersebut dapat dimanfaatkan sebagai pembangkit listrik. Teknologi pembakaran sampah yang menghasilkan listrik dikenal sebagai PLTSa atau Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (Purwaningsih, 2012).

Menurut Hutagalong (2007), proses konversi termal pada proses pembakaran sampah dapat dilakukan dengan berbagai cara yaitu: insinerasi, pirolisis, dan gasifikasi. Berikut penjelasan mengenai ketiganya:

#### 1. Insinerasi

Pada dasarnya, proses insinerasi adalah reaksi oksidasi cepat bahan organik padat (sampah) menjadi bahan anorganik dengan menggunakan oksigen. Panas yang dihasilkan oleh proses insinerasi dapat digunakan untuk mengkonversi suatu materi menjadi materi lain dan energi, seperti energi listrik dan panas. Hasil dari proses insinerasi adalah gas dan *ash*.

Keunggulan dari proses insinerasi adalah mampu mereduksi volume sampah hingga 70%, abu yang dihasilkan dari proses pembakaran dapat digunakan sebagai bahan bangunan (walaupun memiliki harga yang rendah), serta dapat menghasilkan

energi listrik. Sedangkan kelemahan dari proses insinerasi adalah teknologi insinerasi memerlukan biaya investasi, operasi, dan pemeliharaan yang tinggi serta emisinya dapat mengakibatkan polusi udara dan lainnya.

Menurut Hidayah (2007), Faktor yang mempengaruhi proses insinerasi adalah: Komposisi atau jenis limbah, waktu Insinerasi, suhu, dan berat limbah.

Menurut Cheremisinoff (1987), Insinerasi sering digunakan sebagai proses penghancuran sampah secara praktis dan paling efektif karena dapat menghancurkan berbagai jenis sampah seperti: bahan padat mudah terbakar, bahan *semi-solid*, lumpur, limbah cair konsentrasi tinggi, serta limbah gas. Selain dapat mengurangi jumlah sampah, insinerasi dapat mengkonversi sampah menjadi energi terbarukan

## 2. Pirolisis

Proses pirolisis adalah konversi organik melalui pemanasan dengan menggunakan aplikasi termal, hampa udara, dan tanpa menggunakan oksigen. Dengan adanya proses pemanasan dengan temperatur tinggi, molekul-molekul organik yang berukuran besar akan terurai menjadi molekul organik yang kecil dan lebih sederhana. Hasil pirolisis dapat berupa tar, larutan asam asetat, metanol, padatan *char*, arang, *biooil*, dan *syngas*. Nilai panas gas yang didapatkan dari pembakaran sampah adalah 18 MJ/m<sup>3</sup>

Keunggulan pada proses pirolisis adalah dihasilkannya *biooil* dan *syngas* yang potensial untuk pembangkit listrik yang sangat dibutuhkan oleh produk industri. Gas atau produk yang dihasilkan tersebut dapat digunakan sebagai bahan bakar dalam proses pirolisis itu sendiri. Sedangkan kelemahan dari proses ini adalah prosesnya yang tidak ramah lingkungan, serta biaya produksi yang besar akibat bahan bakar eksternal yang secara terus menerus diperlukan.

## 3. Gasifikasi

Gasifikasi adalah proses termokimia padatan organik (sampah padat perkotaan, limbah pertanian, perkebunan dan kehutanan atau batubara) menjadi gas. Pada proses gasifikasi, diperlukan sedikit udara atau oksigen. Hasil proses gasifikasi berupa gas, *ash*, dan tar. Temperatur pembakaran lebih tinggi dibandingkan kedua proses sebelumnya.

Kelemahan dari proses gasifikasi adalah nilai panas yang dihasilkan lebih rendah dibandingkan kedua proses lainnya, yakni sebesar 4-6 Mj/m<sup>3</sup>. Sedangkan keunggulannya adalah dapat mereduksi sampah rata-rata sebanyak 75%; biaya produksi yang lebih rendah, yaitu pada biaya teknologi dan instalasi serta bahan bakar yang lebih murah, karena menggunakan sekam padi, sampah dapur, daun kering, maupun batubara kualitas rendah; dianggap ramah lingkungan karena jika terjadi pembakaran sempurna, maka gas yang tersisa hanyalah gas CO<sub>2</sub>.

## 2.4 Insinerator

Menurut Nidoni (2017), Insinerator adalah teknologi pengolahan sampah dengan cara pembakaran zat organik dalam material sampah. Insinerator mengkonversi materi sampah menjadi energi panas, *flue gas*, dan *ash* yang kemudian dilepaskan ke atmosfer. *Flue gas* yang dihasilkan oleh insinerator mengandung nitrogen, karbon dioksida, dan sulfur dioksida, yang masing-masing memiliki fungsinya tersendiri apabila digunakan secara optimal. Keuntungan dari insinerator adalah teknologi ini dapat mereduksi massa padatan sampah organik sebanyak 80-85% dan volume sebanyak 95-96%.

### 2.4.1 Prinsip Kerja Insinerator

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

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

2. Selanjutnya terjadi proses pirolisis, yaitu pembakaran tidak sempurna, dimana temperatur belum terlalu tinggi (150 °C. – 300 °C.)
3. Fase berikutnya adalah pembakaran sempurna (>800 °C.). Proses Insinerasi dapat dilihat pada gambar 2.5



Gambar 2. 5 Proses Insinerasi

Sumber: Nidoni, 2017

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

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

#### 2.4.2 Ruang Bakar Insinerator

Menurut Fadly (2014), jenis insinerator berdasarkan ruang bakarnya terdiri dari 2 (dua) yaitu *primary chamber* dan *secondary chamber*.

### 1. *Primary Chamber*

*Primary chamber* berfungsi sebagai ruang pembakaran limbah. Selain pembakaran, reaksi pirolisa juga terjadi dimana material organik terdegradasi menjadi karbon monoksida dan metana. Pemanasan *primary chamber* dibantu oleh panas dari *burner* dan diatur supaya suhu mencapai rentang 600°C-800°C. Udara untuk pembakaran disuplai oleh *blower* dalam jumlah yang terkontrol. Padatan yang tersisa dapat berupa abu dan padatan tak terbakar, maupun karbon berupa arang. Padatan tak terbakar dapat diminimalisir dengan penyortiran limbah, sedangkan arang dapat diminimalisir dengan pemberian suplai oksigen secara kontinyu.

### 2. *Secondary Chamber*

Pada *secondary chamber*, terjadi pembakaran lebih lanjut terhadap gas hasil pembakaran dan pirolisa pada suhu 800 °C-1000 °C. Pembakaran gas dapat berlangsung dengan baik apabila terjadi percampuran yang tepat antara oksigen dengan gas hasil pirolisa. Gas hasil pirolisa (metana, etana, dan hidrokarbon lainnya) akan terurai menjadi gas CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>O.

#### 2.4.3 ***Destruction Removal Efficiency (DRE)***

*Destruction Removal Efficiency (DRE)* adalah presentase molekul suatu zat yang dihilangkan atau dihancurkan pada insinerator sesuai dengan jumlah molekul yang masuk kedalam system. Contohnya DRE 99,99% berarti sebanyak 9999 molekul dihancurkan pada setiap 10000 molekul yang masuk. Parameter yang diukur untuk adalah bobot limbah sisa pembakaran yang dihasilkan berupa abu (*ash*). Efisiensi *removal* dihitung dengan rumus *Destruction Removal Efficiency (DRE)* yaitu dengan presentase perbandingan bobot limbah sisa pembakaran dan bobot limbah yang dibakar pada persamaan (1) dibawah ini:

$$DRE (\%) = \frac{\text{Bobot sampah masuk} - \text{bobot sisa pembakaran}}{\text{Bobot sampah masuk}} \times 100\% \quad (1)$$



#### 2.4.4 Emisi Gas Pada Insinerator

Menurut Pradipta (2011), Emisi gas hasil pembakaran dalam insinerator harus dibersihkan dari polutan sebelum dilepas ke atmosfer agar tidak terjadi pencemaran udara, karena itu insinerator yang baik harus dilengkapi dengan teknologi *Air Pollution Control* (APC). Beberapa emisi yang dihasilkan dari pembakaran sampah menggunakan insinerator adalah  $\text{SO}_3$  dan  $\text{Cl}_2$ .  $\text{SO}_3$  memiliki sifat toksisitas sepuluh kali lipat lebih berbahaya dibandingkan dengan  $\text{SO}_2$ . Kematian dikarenakan paparan  $\text{SO}_3$  telah dilaporkan di India dan Jamaika. Proses desulfurisasi pada gas buang seperti *wet limestone process* dapat menghilangkan  $\text{SO}_2$  secara efektif, tapi kurang efektif dalam menghilangkan  $\text{SO}_3$ . Konsentrasi  $\text{SO}_3$  dapat meningkat dalam suhu pembakaran di atas  $800\text{ }^\circ\text{C}$  (Kikuchi, 2001). Manusia dapat terkontak gas klorin dalam jangka pendek maupun jangka panjang. Beberapa studi menunjukkan bahwa pekerja yang terpapar gas  $\text{Cl}_2$  beresiko terkena bronkitis kronis dan *wheezing attack* (White dkk, 2010)

#### 2.4.5 Kelemahan Insinerator

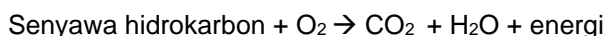
Menurut Greeneration (2018), selain biaya operasional dan perawatan yang mahal, insinerator yang tidak dilengkapi dengan unit pengolah gas buang seperti *wet scrubber* dapat membahayakan masyarakat. Masyarakat yang tinggal dekat dengan insinerator berpotensi terkena bahan kimia berbahaya melalui udara yang tercemar atau hasil pertanian yang terkontaminasi. Hal ini disebabkan karena proses insinerasi sampah yang dapat menghasilkan dioksin dan furan yang memiliki karakteristik bioakumulatif, persisten, dan karsinogen. Abu yang dihasilkan pada insinerator dapat menghasilkan logam-logam berat berbahaya seperti merkuri, timbal, kadmium, dll yang merupakan kategori limbah B3 sehingga dibutuhkan *landfill khusus untuk pengolahannya*.

Kelemahan lain dari pembakaran sampah menggunakan insinerator adalah membutuhkan konsumsi bahan bakar yang cukup banyak saat tidak adanya kontrol yang tepat pada temperatur dan *incinerator cycle time*. Salah satu contoh bahan bakar insinerator adalah minyak diesel. Bahan bakar yang

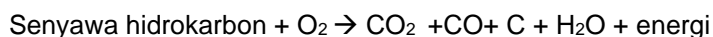
digunakan dapat menjadi cukup tinggi dikarenakan adanya pembakaran sampah yang sangat tinggi akan kadar air atau saat udara terlalu banyak masuk kedalam sistem. Injeksi bahan bakar dilakukan secara kontinyu atau hanya diawal saja tergantung dari nilai kalor sampah yang akan dibakar. Hal ini dilakukan supaya temperatur insinerator tidak menurun sehingga terjadi penurunan efisiensi pembakaran pula (Manyele dkk, 2012)

## 2.5 Pembakaran

Menurut Listiyanawati (2008), pada umumnya reaksi pembakaran terbentuk dengan bantuan oksigen dan benda yang dapat terbakar (*combustible*) seperti kayu, kain, kertas, minyak bakar, gas-gas yang dalam klasifikasi kimia termasuk senyawa organik, yakni senyawa gugus karbon. Faktor yang menyebabkan terjadinya pembakaran adalah adanya bahan yang mudah terbakar, panas, dan oksigen. Ketiga hal ini saling mengikat dengan jumlah yang tepat sehingga dapat terjadi reaksi pembakaran. Pada proses pembakaran, karbon biasanya dioksidasi menjadi air. Dengan kata lain reaksi pembakaran sempurna (cukup oksigen) dapat ditulis sebagai berikut:



Apabila reaksi pembakaran senyawa karbon tidak disertai dengan oksigen yang cukup, maka terjadi reaksi pembakaran tidak sempurna dapat ditulis sebagai berikut:



Pembakaran tidak sempurna menghasilkan lebih sedikit kalor sehingga mengurangi efisiensi bahan bakar, selain itu pembakaran tidak sempurna akan menghasilkan beberapa senyawa berbahaya seperti *polycyclic aromatic hydrocarbon* (PAH), dioksin, furan, dan karbon monoksida (CO).

Menurut Budiman (2001), proses pembakaran aktual dipengaruhi oleh 5 faktor :

1. Pencampuran udara dengan bahan yang baik (*Turbulence*)

2. Suhu pembakaran (*Temperature*)
3. Lamanya waktu pembakaran yang berhubungan dengan laju pembakaran (*Time*)
4. Kebutuhan udara untuk proses pembakaran
5. Berat bahan yang akan dibakar.

Proses pembakaran sampah berlangsung secara bertahap. Tahap awal terjadi penguapan kandungan air sampah yang belum terbakar menggunakan panas dari bahan terbakar yang berada di sekelilingnya atau menggunakan energi panas yang ditambahkan dari luar. Pada saat pemanasan sampah terjadi pelepasan karbon atau bahan volatil yang terkonversi menjadi gas yang mudah terbakar, proses ini disebut gasifikasi. Gas ini selanjutnya bercampur dengan oksigen yang dapat mengalami reaksi oksidasi. Kondisi ini apabila menghasilkan temperatur cukup tinggi dan berlangsung lama dapat terkonversi secara sempurna (*complete combustion*) menghasilkan uap air dan CO<sub>2</sub> yang dilepaskan ke udara. Pencampuran udara dan bahan bakar yang baik dalam pembakaran biasanya tidak dapat dicapai tetapi bisa 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> (Budiman, 2001)

Menurut Damanhuri (2006), dalam proses pembakaran, hal yang pertama kali terjadi adalah proses penguapan air yang ada dalam kandungan sampah. Hal ini berarti dengan semakin tingginya kadar air dalam sampah, maka semakin banyak pula energi yang dibutuhkan untuk menguapkan air tersebut dan semakin rendah pula kalor yang dihasilkan dari pembakaran.

Seberapa basah atau kering suatu bahan bakar akan sangat mempengaruhi pembakaran. Dalam beberapa kasus, kadar air yang lebih tinggi dalam suatu bahan bakar dibutuhkan untuk mengurangi emisi, tetapi kadar air yang terlalu tinggi juga dapat membuat waktu pembakaran yang lebih lama, jumlah bahan bakar yang lebih banyak, dan emisi yang lebih tinggi (Yuntewi, 2008)

### 2.5.1 Faktor yang Mempengaruhi Pembakaran Sempurna

Menurut Lee dkk (2017), kondisi sebaliknya dapat terjadi yaitu apabila temperatur pembakaran rendah dan waktu tinggal pada ruang bakar cepat terjadi pembakaran yang tidak sempurna (*incomplete combustion*) yang dapat menghasilkan asap. Dampak lain dari pembakaran tidak sempurna adalah terbentuknya polutan lain yang semula tidak terdapat dalam sampah karena terjadi reaksisintesa yang disebut *denovo* menghasilkan dioksin dan furan. Tingkat kesempurnaan pembakaran di pengaruhi oleh beberapa variabel berikut :

#### A. Temperatur

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

Menurut Kaiser (1964), untuk menghindari temperatur ruang bakar yang terlalu tinggi sehingga bisa menyebabkan *slag* pada dinding ruang bakar, udara yang cukup disuplai untuk mengatur temperatur pada gas buang ruang bakar yaitu sekitar 1600 – 1800 °F atau 871 – 982 °C.

#### B. Waktu Tinggal

Pembakaran sempurna membutuhkan waktu tinggal yang cukup, yaitu waktu yang dibutuhkan untuk menjamin terjadinya percampuran yang sempurna antara udara dan bahan bakar agar dapat bereaksi secara sempurna. Pembakaran pada temperatur rendah, sampah dengan nilai panas rendah dan turbulensi campuran gas yang rendah memerlukan waktu tinggal yang lebih lama untuk menghasilkan pembakaran yang sempurna. Menurut Rhozman dkk (2019), suhu pembakaran sangat berpengaruh

pada pengoperasian insinerator, karena semakin tinggi suhu pembakaran dan semakin lama waktu pembakaran akan menghasilkan abu yang sedikit dan kualitas abu serta asap paling baik.

### C. Turbulensi

Turbulensi pencampuran gas yang terbakar dan udara diperlukan untuk menjamin terjadinya kontak yang cukup antara bahan bakar dan udara. Hal ini dapat menghasilkan temperatur yang tinggi sehingga menyebabkan pembakaran sempurna. Tingkat pencampuran tergantung dari rancangan ruang bakar insinerator dan sistem injeksi udara. Sistem pembakaran dengan sirkulasi udara alami pada sistem pembakaran terbuka tidak dapat menghasilkan pencampuran yang baik. Demikian juga tumpukan sampah yang terlalu tinggi dapat mengganggu turbulensi pencampuran udara dan gas yang mudah terbakar karena tersumbatnya rongga jalur aliran kedua bahan ini. Rancangan insinerator yang dapat menghasilkan pembakaran sempurna menggunakan sistem sirkulasi paksa (*forced circulation*) untuk memperoleh turbulensi pencampuran.

Menurut Taufiq (2008), udara (oksigen) sangat mempengaruhi proses pembakaran serta produk dari proses pembakaran. Terdapat 2 jenis rasio udara-bahan bakar yaitu rasio campuran kurus (*lean mixture*) dan rasio campuran kaya bahan bakar (*rich mixture*). Rasio udara-bahan bakar dapat dihitung dengan metode rasio ekivalen ( $\Phi$ ) yaitu:

$$\Phi = \frac{AFR_s}{AFR_a} = \frac{FAR_a}{FAR_s}$$

Keterangan:

- AFR (*actual air-fuel ratio*)
- AFR<sub>s</sub> (*stoichiometric air-fuel ratio*)
- FAR (*actual fuel-air ratio*)
- FAR<sub>s</sub> (*stoichiometric fuel-air ratio*)
- $\Phi > 1$ , terdapat kelebihan bahan bakar dengan sedikit udara dan campurannya disebut sebagai campuran kaya bahan bakar (*fuel-rich mixture*)

- $\Phi < 1$ , campurannya disebut sebagai campuran miskin bahan bakar dan udara yang berlebihan (*fuel-lean mixture*)
- $\Phi = 1$ , merupakan campuran stoikiometrik (pembakaran sempurna)

#### D. Komposisi Sampah

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

Menurut Novita (2010), nilai kalor sangat dipengaruhi oleh kadar air dan hidrogen sampah. Nilai kalor juga dipengaruhi oleh kadar volatil dan abu. Semakin tinggi kadar volatil yang terbakar, maka nilai kalor semakin tinggi.

Menurut Damanhuri (2006), sampah yang paling baik untuk digunakan dalam *Waste To Energy (WTE)* maupun RDF adalah kertas, plastik, dan tekstil.

Sampah tekstil yang banyak dijumpai di tempat pembuangan adalah yang tidak layak untuk didaur ulang lagi. Tekstil di sumber memiliki kadar air yang kecil, namun bahan ini sangat baik dalam menyerap air, sehingga kebanyakan dari tekstil yang masuk ke TPA sudah dalam keadaan basah. Kadar volatil yang tinggi yaitu >96% menjadikan tekstil memiliki nilai kalor yang tinggi juga. HHV tekstil berkisar antara 4200-4800 kkal/kg *dry basis* dan LHV yang masih berkisar antara 4000-4600 kkal/kg. Sampah tekstil yang biasanya berada dalam jumlah yang banyak sangat berpotensi untuk dijadikan bahan bakar pada insinerator atau dijadikan pellet *Refused Derived Fuel (RDF)*.

Menurut Subramanian (2000), plastik memiliki nilai kalor yang sangat tinggi yaitu berkisar antara 5000-13000 kkal/kg *dry basis*. Hal ini disebabkan karena plastik terbuat dari petroleum atau gas alam sehingga dapat menyimpan kandungan energi yang sangat tinggi dibandingkan dengan komponen lain yang ada didalam sampah. Plastik juga memiliki kadar air yang sangat rendah, yaitu <1%, kecuali untuk PET yaitu 3,5%. LHV plastik

sendiri tidak berbeda jauh dari HHV nya. Dengan nilai kalor yang sangat tinggi ini, plastik sangat potensial untuk dibakar pada insinerator atau dimanfaatkan sebagai RDF.

Sedangkan sampah makanan dan pasar memiliki kadar air yang cukup besar sehingga sulit dimanfaatkan dalam *waste To Energy* (WTE). Pada aplikasinya, sampah jenis ini biasa dibakar di alam bebas tanpa adanya perhatian mengenai proses pembakaran dan menyebabkan pencemaran udara. Kayu memiliki materi organik yang cukup tinggi dan menyisakan abu yang cukup rendah. Karena kadar volatilnya tinggi, kayu memiliki nilai kalor yang tinggi pula sekitar 4700 kkal/kg *dry basis*. Sedangkan untuk daun dan rumput berkisar antara 4000 kkal/kg kering.

### **2.5.2 Pembakaran Polypropylene**

Jika diasumsikan pembakaran sempurna, maka reaksi kimia dalam pembakaran *polypropylene* adalah:



Menurut Boettner (1973), dilakukan analisis termal pembakaran PP yang menunjukkan bahwa plastik sepenuhnya terbakar pada suhu 440 °C. PP mulai terurai pada suhu yang lebih rendah dari *polyethylene* (PE), karena rantai karbonnya yang bersifat lebih lemah. Analisis kualitatif dilakukan dimana pada pembakaran PP teridentifikasi karbon monoksida, *methane*, dan propilen, adanya spektrum hidrokarbon C<sub>1</sub> – C<sub>6</sub>, serta membentuk residu cair dengan titik didih yang tinggi.

### **2.6 Perhitungan teoritis pada Insinerasi Sampah**

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Nabizadeh dkk (2016), dalam memperkirakan panas dan emisi gas buang yang dikeluarkan oleh sebuah insinerator, dilakukan dalam beberapa Langkah yaitu:

1. Memasukkan data awal

Data awal yang dibutuhkan adalah: jumlah sampah dan jenis sampah yang diinsinerasi, serta berapa *excess air* yang akan digunakan

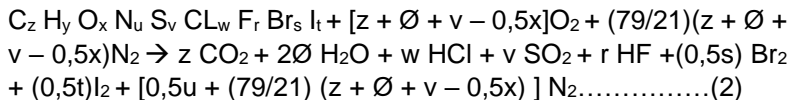
2. Mengkonversi komposisi sampah dari basis massa menjadi basis atom.

Analisis masing-masing elemen pembentuk sampah menjadi basis atom berdasarkan presentase elemen dan berat atomnya. Menurut Czuros (1997), sampel padat yang dianalisa secara *wet basis* dikonversi menjadi *dry basis*. Untuk mengkonversi dari *wet basis* menuju *dry basis*, jumlah dibagi dengan fraksi decimal dari berat kering sampel. Misalnya pada suatu sampel dalam keadaan *wet basis* mengandung 25 mg/kg barium dan kadar air 12, maka berat keringnya adalah  $100-12=88\%$ . Kandungan barium pada sampel dalam keadaan *dry basis* adalah  $25/0,88 = 28,4$  mg/kg

Melakukan Proximate dan Ultimate Analysis. Proximate analysis adalah analisis terhadap kelembapan sampah, kandungan volatil di dalam sampah, fixed carbon, dan ash dalam sampah. Sedangkan ultimate Analysis adalah analisis terhadap unsur-unsur kimia penyusun sampah. Sampah mengandung komponen karbon, hydrogen, oksigen, nitrogen, sulfur, dan ash. Analisis ini sangat menentukan system pengolahan sampah yang efektif digunakan untuk memusnahkan sampah. (Tchobanoglous, 1993)

3. Menentukan persamaan stoikiometri

Dengan persamaan:



Dimana:

$$\emptyset = \frac{y-w-r}{4} \text{ , jika } y > (w+r) \dots\dots\dots(3)$$

$$\emptyset = 0 \text{ , jika } y \leq (w+r) \dots\dots\dots(4)$$

4. Estimasi *Net Heating Value* (NHV)

Menggunakan metode Dulong untuk mengestimasi NHV berdasarkan presentase massa dari elemen penyusun sampah. Menurut Santoleri (2000), *Net Heating Value* (NHV) pada suatu material adalah jumlah panas yang dilepaskan saat material



tersebut terbakar sepenuhnya dengan oksigen. NHV pada sampah dapat dimasukkan berdasarkan data yang ada, maupun diestimasi menggunakan metode Dulong. Metode Dulong digunakan saat data panas pembakaran tidak tersedia. Metode ini dapat dilakukan pada sampah yang mengandung karbon, hidrogen, oksigen, sulfur, nitrogen, dan/atau klorin. Namun tidak berlaku pada sampah yang mengandung fluorin, bromin, dan lodin.

$$NHV_{Btu/lb} = 14000 m_c + 45000 (m_H - 0,125 m_o) - 760 m_{cl} + 4500 m_s \dots \dots (5)$$

Keterangan:

- $m_c$  = persentase massa karbon pada *dry basis*
- $m_H$  = persentase massa hydrogen pada *dry basis*
- $m_o$  = persentase massa oksigen pada *dry basis*
- $m_{cl}$  = persentase massa klor pada *dry basis*
- $m_s$  = persentase massa sulfur pada *dry basis*

5. Estimasi awal temperatur kerja rata-rata insinerator  
Menggunakan persamaan:

$$T = 60 + (NHV/0,3) / [1 + (1+EA)(7,5 \times 10^{-4}) (NHV)] \dots \dots \dots (6)$$

Keterangan:

- EA = *Excess Air* pada data awal
- NHV = *Net Heating Value* dari tahap 4

Nilai kalor pada suatu zat adalah panas yang diproduksi oleh pembakaran suatu zat pada kondisi tertentu. Nilai kalor dapat berupa: *Gross Calorific Value*, yaitu panas dari pembakaran pada volume tetap. Atau *Net Calorific Value*, yaitu panas dari pembakaran pada tekanan tetap. (Nzihou dkk, 2014)

6. Menghitung konstanta kesetimbangan reaksi kimia  
Menggunakan persamaan:

-Untuk HCl/Cl<sub>2</sub>:



$$K_1 = (7048,7/T) + (0,0151 \ln T) - (9,06 * 10^{-5}T) - (2,714 * 10^4 T^{-2}) - 8,09 \dots \dots \dots (8)$$

-Untuk SO<sub>2</sub>/SO<sub>3</sub>:



$$K_2 = (11996/T) - (0,362 \ln T) + (9,36 * 10^{-4} T) - (2,969 * 10^5 T) - 9,88 \dots \dots \dots (10)$$

7. Menghitung tekanan parsial gas buang

Tekanan parsial gas buang dapat dihitung menggunakan koefisien pada persamaan stoikiometrik reaksi (2) Setelah itu, tekanan parsial gas buang dikoreksi dengan konstanta stoikiometrik pada tahap sebelumnya dan pada persamaan (11) dan (12) berikut:

$$K_1 = \frac{P(Cl_2)P(H_2O)}{P(HCl)^2 P(O_2)^{0,5}} \dots \dots \dots (11)$$

$$K_2 = \frac{P(SO_3)}{P(SO_2)P(O_2)^{0,5}} \dots \dots \dots (12)$$

8. Menentukan komposisi gas buang

Komposisi gas buang awal didapatkan berdasarkan tekanan parsial dan koefisien pada persamaan stoikiometrik reaksi.

9. Menghitung suhu kerja insinerator sebenarnya

Suhu kerja dihitung dengan keseimbangan entalpi. Untuk dapat menghitung entalpi, perubahan yang terjadi saat gas buang dipanaskan dari suhu 60 °F atau 15 °C menjadi suhu insinerator, dibutuhkan kapasitas panas sebagai fungsi temperature. Konstanta kesetimbangan harus dihitung ulang pada data suhu yang baru ini. Lalu tahap perhitungan diulang dari tahap ke tujuh, dan tekanan parsial dari komponen gas buang dihitung ulang menggunakan konstanta kesetimbangan yang telah diperbarui. Barulah hasil akhir dari

komposisi gas buang dapat dihasilkan. Persamaan yang digunakan adalah:

$$NHV(\text{kal.g}) + \Delta a (T-298) + (\Delta b/2)(T^2-298^2) - \Delta c [(1/T) - (1/298)] = 0 \dots\dots\dots(13)$$

10. Menghitung hasil akhir

Pada tahap terakhir dihitung gas buang yang terdiri dari konsentrasi sulfur dioksida (SO<sub>3</sub>), dan konsentrasi Cl<sub>2</sub>

**2.7 Penelitian Terdahulu**

Liang dkk (2008) melakukan penelitian untuk mengetahui pengaruh kandungan air pada sampah terhadap emisi gas *CLfixed bed*. Temperatur yang dihasilkan berkisar pada temperatur 950 °C. Untuk % kadar air sampah divariasikan menjadi 5 variasi yaitu: 8,8% ; 18,1% ; 28,6% ; 39,1% ; 49,2% untuk emisi yang dihasilkan adalah CO yaitu 28867,2 ppm ; 17396,48 ppm ; 13563,62 ppm ; 11098,79 ppm ; 10177,58 ppm serta rataan konsentrasi CO<sub>2</sub> dalam % volume sampah yaitu: 7,88% ; 5,56% ; 5,08% ; 4,48% ; 4,17 % yang menunjukkan bahwa semakin tinggi kadar air sampah maka emisi yang dikeluarkan semakin rendah.

Wiyono (2016) juga melakukan penelitian pembakaran sampah kota dengan insinerator tipe unggun tetap (*fixed bed*) dengan kesimpulan sampah kain katun, plastik polietilen, san sampah campuran dengan kadar air hingga 40% mampu terbakar sendirinya tapi sampah basah dengan kadar air lebih dari 80% tidak dapat terbakar dengan sendirinya. Energi kalor pada gas hasil pembakaran tertinggi tertinggi mencapai 10.406.495,56 kal yaitu pada pembakaran sampah tunggal polietilen. Energi kalor terendah sebesar 2.103.259,49 kal didapatkan dari hasil pembakaran campuran kain katun 20%, plastik polietilen 20%, kertas 20%, dan sampah basah 40%. Pada pembakaran sampah untuk mendapatkan energi kalor, kadar air maksimum pada sampah yang disarankan adalah 25%. Jenis sampah yang dapat dijadikan bahan bakar untuk pengeringan dan pembangkitan *steam* adalah sampah tunggal jenis kain katun dan plastik polietilen, serta sampah campuran

dengan komponen sampah plastik polietilen minimum 40% dan sampah basah maksimum 20%.

Panagiotou (1994) melakukan penelitian pembakaran partikel PP pada *laminar flow drop tube furnace* dalam atmosfer terkontrol. Hasil yang didapatkan adalah PP memiliki ukuran partikel 250-297  $\mu\text{m}$ , temperatur dinding ruang bakar 1473 °K dan temperatur *flame* 1500-2200 °K

Courtemanche (1998) melakukan analisis emisi gas pada pembakaran sampah padat yang telah dihancurkan berupa arang, ban bekas, PS, PE, PVC, dan PP. Emisi yang dihasilkan dari pembakaran PP adalah NO<sub>x</sub> dengan konsentrasi 30-80 PPM.

Li dkk (2008) melakukan penelitian untuk mempelajari pengaruh kadar kelembaban pada proses pembakaran insinerasi sampah kota. Semakin tinggi tingkat kelembaban sampah, maka akan memperpanjang waktu pengeringan dan membuat proses pembakaran jadi semakin lemah. *Polyvinyl Chloride* (PVC), *polystyrene* (PS), dan serpihan kayu menghasilkan konsentrasi CO yang tinggi karena memiliki kadar volatil yang tinggi. Pada insinerasi tipe *fluidized bed*, konsentrasi CO dan NO<sub>x</sub> menurun seiring dengan naiknya kadar air, sehingga dapat disimpulkan bahwa molekul H<sub>2</sub>O memiliki efek positif pada pembakaran.

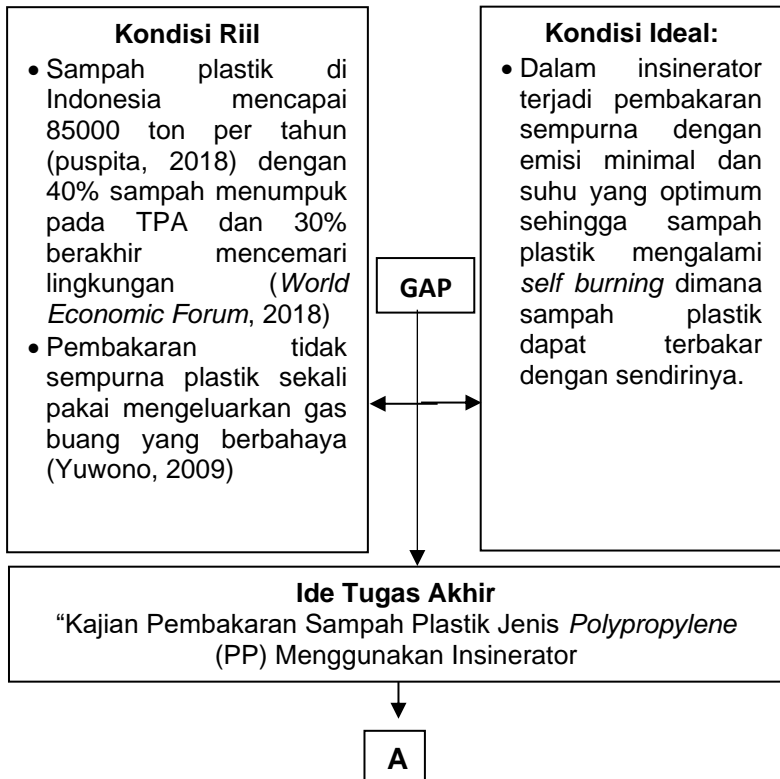
Sun dkk (2008) melakukan penelitian mengenai efek kadar abu pada proses pembakaran sampah kota dengan reaktor *fixed bed*. Hasilnya adalah semakin tinggi kadar abu, maka kecepatan pembakaran bahan bakar semakin rendah sehingga menghasilkan partikel arang yang tidak terbakar sempurna, menyebabkan kehilangan pada *combustible material* sehingga mengurangi efisiensi pembakaran dan memperpanjang waktu pembakaran sampah kota.

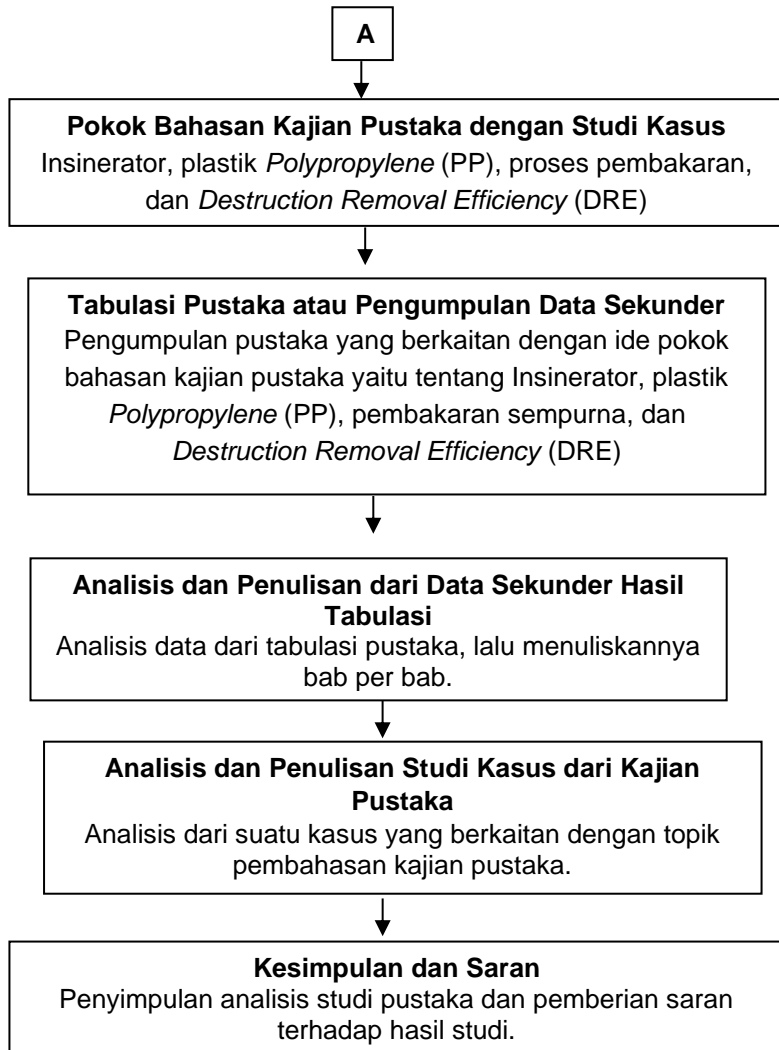
## BAB 3

### METODE PENELITIAN

#### 3.1 Kerangka Studi

Kerangka kajian pustaka dengan studi kasus merupakan rancangan alur jalannya proses pelaksanaan Tugas Akhir. Penyusunan alur berupa langkah-langkah yang bertujuan untuk mempermudah pelaksanaan dan sebagai acuan dalam menjalankan kajian pustaka dengan studi kasusnya. Kerangka dapat dilihat pada Gambar 3.1 di bawah ini:





Gambar 3. 1 Kerangka Kajian Pustaka dengan Studi Kasus

### 3.2 Metode Studi

Metode studi berisi rangkaian langkah-langkah studi yang akan dilakukan hingga mendapatkan kesimpulan. Metode studi dibuat agar pelaksanaan studi terarah dan dapat mencapai tujuan. Dalam penyusunan Tugas Akhir ini, rencana awal penelitian adalah melakukan insinerasi sampah menggunakan unit insinerator departemen Teknik Lingkungan ITS, namun dikarenakan ada pandemi Covid-19, maka penelitian dilakukan secara studi literatur dengan perhitungan teoritis menggunakan kapasitas insinerator yang sebenarnya. Sehingga pada penelitian ini dilakukan dua tahap pelaksanaan, meliputi kajian pustaka dan studi kasus yang berkaitan dengan referensi yang dikaji. Berikut dua tahap pekerjaan pokok yang dilakukan dalam pelaksanaan Tugas Akhir ini:

#### 3.2.1 Kajian Pustaka

Kajian pustaka dilakukan dengan menelusuri berbagai referensi yang berkaitan dengan Insinerator, plastik PP, pembakaran sempurna, dan DRE. Dari hasil penelusuran pustaka ini, tulisan disusun kembali menggunakan bahasa penulis sendiri.

Jenis kepustakaan yang dipelajari meliputi:

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

#### 3.2.2 Studi Kasus

Studi kasus dalam penulisan Tugas Akhir ini adalah menghitung secara teoritis pembakaran pada unit insinerator domestik yang belum pernah diuji sebelumnya dengan referensi dari data sekunder dan berbagai pustaka yang telah dipelajari. Data yang diambil adalah data sekunder yang diperoleh dari:

1. Tugas Akhir
2. Jurnal
3. Tesis
4. *Website*

Data yang didapat dianalisa dengan kajian pustaka yang telah dipelajari. Perhitungan secara teoritis ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh pembakaran plastik PP pada unit insinerator domestik dengan variasi jumlah PP dan kadar air sampah terhadap temperatur dan gas buang yang dihasilkan. Langkah-langkah perhitungan yang digunakan dalam laporan ini adalah:

1. Memasukkan data awal
2. Mengkonversi komposisi sampah dari basis massa ke basis atom
3. Menentukan persamaan stoikiometrik
4. Mengestimasi *Net Heating Value* (NHV)
5. Mengestimasi temperatur operasi rata-rata
6. Menghitung konstanta kesetimbangan reaksi kimia
7. Menghitung tekanan parsial gas buang
8. Menghitung komposisi gas buang akhir
9. Menghitung *Destruction Removal Efficiency* (DRE)

Data perhitungan teoritis berupa temperatur rata-rata, konsentrasi emisi gas buang, dan DRE yang diperoleh dari semua variasi akan dimasukkan kedalam *bar chart* untuk dibandingkan dan dianalisa sesuai literatur yang tersedia.

### **3.3 Sistematika Penulisan**

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

- BAB 1: Pendahuluan  
Bab ini menguraikan alasan yang melatarbelakangi penulisan Tugas Akhir, penjabaran perumusan masalah, tujuan yang ingin dicapai, ruang lingkup penulisan, dan manfaat yang akan didapatkan dari studi pustaka dengan studi kasus ini, serta sistematika penulisan dari Tugas Akhir.



- BAB 2: Studi Literatur
  - 2.1 Plastik
 

Pada bab ini diuraikan gambaran umum mengenai tujuh (7) jenis plastik yang sering digunakan pada kehidupan sehari-hari
  - 2.2 Plastik *Polypropylene* (PP)
 

Pada bab ini diuraikan gambaran umum mengenai plastik PP. Selanjutnya diuraikan mengenai karakteristik kimia dan fisika plastik PP.
  - 2.3 Pengolahan Sampah Secara Termal
 

Pada bab ini diuraikan mengenai pengolahan sampah secara termal
  - 2.4 Insinerator
 

Pada bab ini diuraikan gambaran umum mengenai insinerator. Mulai dari pengertian, jenis insinerator, serta proses yang terjadi di dalam insinerator. Selain insinerator, dijelaskan pula mengenai proses insinerasi.
  - 2.5 Pembakaran
 

Pada bab ini diuraikan teori mengenai pembakaran. Selain itu dibahas pula mengenai faktor-faktor yang mempengaruhi terjadinya pembakaran sempurna.
  - 2.6 Perhitungan Teoritis pada Insinerasi Sampah
 

Pada bab ini diuraikan perhitungan secara teoritis berupa rumus dalam memperkirakan suhu dan emisi yang dihasilkan pada proses insinerasi sampah.
  - 2.7 Penelitian Terdahulu
 

Pada bab ini dibahas secara singkat mengenai beberapa penelitian terdahulu yang berkaitan dengan tema penelitian ini.
- BAB 3: Metode Penelitian
 

Bab ini berisi rangkaian langkah-langkah studi yang akan dilakukan hingga mendapatkan kesimpulan. Metode studi dibuat agar pelaksanaan studi terarah dan dapat mencapai tujuan.
- BAB 4: Hasil dan Pembahasan
 

Pada bab ini disajikan hasil perhitungan teoritis dari pembakaran sampah plastik PP pada unit insinerator

domestik yang telah dijabarkan rumus-rumusnya pada bab 2. Lalu dibandingkan dengan hasil dari penelitian-penelitian sebelumnya

- BAB 5: Penutup

- 5.1 Kesimpulan

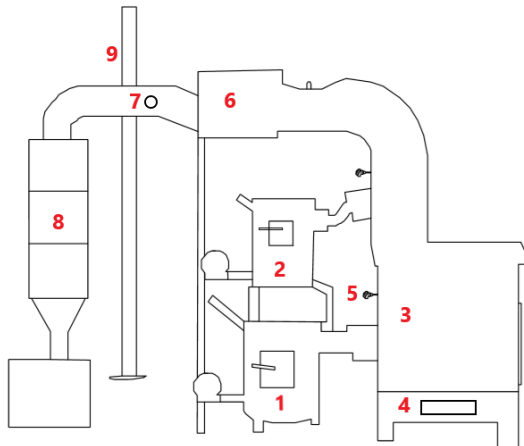
- Kesimpulan merupakan jawaban dari studi literatur yang didapatkan dari hasil dan pembahasan.

- 5.2 Saran

- Saran berisi hal-hal yang masih dapat dikerjakan dengan baik dan dan dikembangkan lebih lanjut.

### 3.4 Bagian-Bagian Insinerator

Alat yang digunakan sebagai dasar dari penelitian berbasis studi literatur ini adalah unit insinerator yang terletak pada Departemen Teknik Lingkungan ITS. Alat ini memiliki kapasitas pembakaran sampah yaitu 10 kg/jam. Desain Alat ditunjukkan pada Gambar 4.1



Gambar 4. 1 Desain Insinerator

Keterangan dan fungsi masing-masing bagian insinerator dijelaskan pada Tabel 3.1

Tabel 3. 1 Nama dan fungsi bagian pada Insinerator

No.	Nama bagian	Fungsi
1	Burner Primer	Membakar bahan bakar seperti arang dan briket untuk ruang pembakaran primer
2	Burner sekunder	Membakar bahan bakar seperti arang dan briket untuk ruang pembakaran sekunder
3	Ruang pembakaran primer	Pembakaran sampah
4	Penampungan abu	Untuk mengambil abu hasil pembakaran sampah
5.	<i>Thermocouple type K</i>	Pengukur temperatur pada ruang pembakaran utama
6	Cooling reactor	Menurunkan suhu gas yang keluar dari ruang pembakaran
7	<i>Inlet Gas Analyzer</i>	Memasukkan <i>gas analyzer</i> untuk mengukur emisi gas
8	<i>Wet Scrubber</i>	Menurunkan emisi dari yang yang keluar dari ruang bakar
9	Cerobong gas buang akhir	Mengeluarkan gas buang
10.	Ruang pembakaran sekunder	Pembakaran gas

**“Halaman ini Sengaja Dikosongkan”**

## BAB 4

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 5.1 Penentuan Variabel

Variabel bebas yang digunakan adalah jumlah sampah dan kadar air pada sampah. Variasi sampah yang diinsinerasi dapat dilihat pada Tabel 4.1

Tabel 4. 1 Variasi Sampah yang diinsinerasi

Komponen sampah	Variasi (%)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Polypropylene	50	50	60	60	70	70	80	80
Kain	25	25	20	20	15	15	10	10
Kayu	25	0	20	0	15	0	10	0
Kertas dan Kardus	0	25	0	20	0	15	0	10

Tabel diatas menjelaskan presentase sampah yang diinsinerasi dari 10 kg total sampah. Contohnya pada variasi 1, yang diinsinerasi adalah 50% PP (5 kg), 25% Kain (2,5 kg), 25% Kayu (2,5 kg), 0% Kertas dan Kardus (0 kg).

#### 4.2 Proximate dan Ultimate Analysis Sampah yang Diinsinerasi

Proximate Analysis masing-masing komposisi sampah dapat dilihat pada Tabel 4.2

Tabel 4. 2 Proximate Analysis Komponen Sampah

Komponen Sampah	Kadar Air (%)	Kadar Volatil (%)	Kadar Fixed Carbon (%)	Kadar Abu (%)	Sumber
Polypropylene	0,16	93,77	1,62	4	Hakeem, 2018
Kain	10	66	17,5	6,5	Tchobanoglous, 1993

Komponen Sampah	Kadar Air (%)	Kadar Volatil (%)	Kadar Fixed Carbon (%)	Kadar Abu (%)	Sumber
Kayu	20	68	11	1	Tchobanoglous, 1993
Kertas dan Kardus	10,2	75,9	8,4	5	Tchobanoglous, 1993

Berdasarkan Proximate Analysis komponen sampah, maka kadar air masing-masing variasi sampah dapat dilihat pada Tabel 4.3

Tabel 4. 3 Variasi Kadar Air Sampah

Variasi Sampah	Kadar Air (%)
1	7,58
2	5,13
3	6,096
4	4,136
5	4,612
6	3,142
7	3,128
8	2,148

Kandungan masing-masing unsur dapat dilihat pada Tabel 4.4

Tabel 4. 4 *Ultimate Analysis* Sampah

Komposisi Sampah	Komposisi (%)						Sumber
	C	H	O	N	S	Cl	
PP	85,02	13,93	0,96	0,08	0,01	0	Zhou, 2014
kain	47,55	6,3	45,14	0,82	0,13	0,65	Zhou, 2014
kayu	48,35	6,62	44,7	0,04	0,29	0,27	Wu dkk, 2009
kertas dan kardus	45,5	6,25	47,7	0,2	0,2	0,19	Zhou, 2014

Dihitung berat basah dan Berat Kering tiap komponen sampah, perhitungan per 10 kg, karena insinerator memiliki kapasitas 10 kg/jam. Perhitungan dilakukan pada sampah variabel 7 yaitu: 80% *polypropylene* (8 kg), 10% kain (1 kg), serta 10% kertas dan kardus (1 kg).

- Polypropylene

- Berat air = massa per komponen x % kadar air per komponen  
Berat air sampah plastik PP = 8 kg x 0,16 % = 0,0128 kg
- Berat kering = Berat per komponen sampah- berat basah perkomponen  
Berat kering sampah plastik PP = 8 kg – 0,0128 kg = 7,9872 kg
- Mencari massa molekul C, H, O, N, S, dan abu pada tiap komponen sampah. Massa molekul = % komposisi x berat kering  
 Massa C = 85,02 % x 7,9872 kg = 6,79 kg  
 Massa H = 13,93 % x 7,9872 kg = 1,11 kg  
 Massa O = 0,96 % x 7,9872 kg = 0,0767 kg  
 Massa N = 0,08 % x 7,9872 kg = 0,0064 kg  
 Massa S = 0,01 % x 7,9872 kg = 0,0008 kg  
 Massa Cl = 0 kg
- Dilakukan perhitungan yang sama untuk semua komposisi sampah. Massa C,H,O,N,S, dan Cl *dry basis* dalam massa dapat dilihat pada Tabel 4.5

Tabel 4. 5 Massa *Dry Basis*

Komposisi Sampah	Massa Dry Basis (kg)					
	C	H	O	N	S	Cl
PP	6,79	1,11	0,0767	0,0064	0,0008	0,00
kain	0,43	0,06	0,4063	0,0074	0,0012	0,01
kayu	0,39	0,05	0,3576	0,0003	0,0023	0,001
kertas dan kardus	-	-	-	-	-	-
Total	7,61	1,22	0,84	0,01	0,00	0,01

Berdasarkan data diatas, maka dapat ditentukan presentase massa komponen untuk rumus kimia sampah variabel 7 sebagai berikut:

Tabel 4. 6 Total Massa Komponen

Komponen	Massa (Kg)	
	dry basis	%
Karbon	7,605	76,05
Hidrogen	1,222	12,22
Oksigen	0,841	8,41
Nitrogen	0,014	0,14
Sulfur	0,004	0,04
Cl	0,006	0,06

Lalu mengkonversi masing-masing komposisi sampah dari basis massa menjadi basis atom.

$$\begin{aligned} \text{Berat atom C (lb)} &= \% \text{molekul pada sampah} \times \text{berat sampah} / \text{Ar} \\ &= 76,05\% \times 22,046 \text{ lb} / 12,01 \\ &= 1,40 \dots \dots \dots (14) \end{aligned}$$

Massa atom masing-masing komposisi sampah dapat dilihat pada Tabel 4.7

Tabel 4. 7 Berat Atom Komposisi Sampah

Elemen	lb-atom	% atom
C	1,40	33,34
H	2,67	63,83
Cl	0,0004	0,01
S	0,0003	0,01



Elemen	lb-atom	% atom
O	0,12	2,77
N	0,002	0,05
Total	5,66	100,00

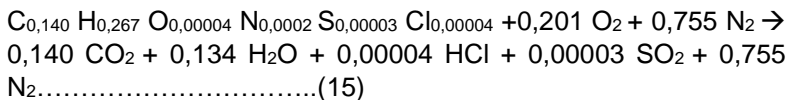
### 4.3 Penyusunan Reaksi Stoikiometrik

Konstanta reaksi pembakaran dapat dilihat pada Tabel 4.8

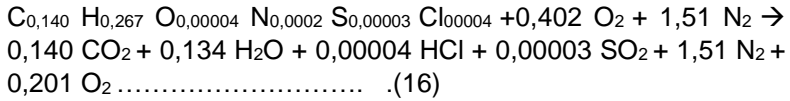
Tabel 4. 8 Konstanta reaksi pembakaran

Simbol	Konstanta	Elemen
z	0,140	C
y	0,267	H
w	0,00004	Cl
v	0,00003	S
x	0,012	O
u	0,0002	N
r	0,000	F
s	0,000	Br
t	0,000	I
w+r	0,00004	
∅	0,067	

Berdasarkan tabel diatas, reaksi pembakaran menjadi:



Dengan *excess air* sebanyak 100%, oksigen dan nitrogen didalam persamaan stoikiometrik dikalikan 2, sehingga menjadi:



#### 4.4 Estimasi Suhu dan Emisi Pembakaran

Memperkirakan NHV dapat dihitung menggunakan metode Dulong dengan persamaan (5)

Sehingga persamaan dulong menjadi:

$$\begin{aligned} NHV &= 14.000 m_c + 45.000 (m_H - 0,125 m_o) - 760 m_{cl} + 4500 m_s \\ &= (14.000 \times 76,05\%) + 45.000 (12,22\% - 0,125 \times 8,41\%) - (760 \times 0,06\%) + (4.500 \times 0,04\%) \\ &= 15.676,58 \text{ Btu/lb} \\ &= 15.676,58 \times 0,555 \\ &= 8.700,50 \text{ Cal/g} \dots\dots\dots (17) \end{aligned}$$

Kemudian menghitung estimasi pertama temperatur kerja insinerator dengan persamaan (5)

Dimana NHV diperoleh dari perhitungan sebelumnya, dan EA adalah *excess air* yaitu 100%. Sehingga diperoleh perhitungan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} T &= 60 + (NHV / 0,3) / [1 + (1+EA)(7,5 \times 10^{-4}) (NHV)] \\ &= 60 + (15.676,58 / 0,3) / [1 + (1+1)(7,5 \times 10^{-4}) (15.676,58)] \\ &= 2.191,57 \text{ }^\circ\text{F} \\ &= 1.472,91 \text{ }^\circ\text{K} \\ &= 1.199,76 \text{ }^\circ\text{C} \dots\dots\dots (18) \end{aligned}$$

Kemudian dihitung konstanta kesetimbangan reaksi kimia untuk HCl/Cl<sub>2</sub> dan SO<sub>2</sub>/SO<sub>3</sub> dengan persamaan (7),(8),(9), dan (10)

-Untuk HCl/Cl<sub>2</sub>:

$$K_1 = (7.048,7/T) + (0,0151 \ln T) - (9,06 \times 10^{-5}T) - (2,714 \times 10^4 T^{-2}) - 8,09$$

$$\begin{aligned}
 &= (7.048,7/1.472,91) + (0,0151 \times \ln 1472,91) - (9,06 \times 10^{-5} \times 1.472,91) - (2,714 \times 10^4 \times 1.472,91^{-2}) - 8,09 \\
 &= 0,035 \text{ atm} \dots \dots \dots (19)
 \end{aligned}$$

-Untuk SO<sub>2</sub>/SO<sub>3</sub>:

$$\begin{aligned}
 K_2 &= (11.996/T) - (0,362 \ln T) + (9,36 \times 10^{-4} T) - (2,969 \times 10^5 T) - 9,88 \\
 &= (11.996/1.472,91) - (0,362 \ln \times 1472,91) + (9,36 \times 10^{-4} \times 1.472,91) - (2,969 \times 10^5 \times 1.472,91) - 9,88 \\
 &= 0,043 \text{ atm} \dots \dots \dots (20)
 \end{aligned}$$

Kemudian tekanan parsial dari gas buang dapat dihitung dengan koefisien pada persamaan stoikiometrik (4). Berdasarkan persamaan ini, jumlah total mol pada gas buang per lb mol sampah adalah 1,984. Untuk insinerator yang beroperasi pada 1 atm, tekanan parsial sama dengan fraksi mol, dapat dilihat pada Tabel 4.9

Tabel 4. 9 Tekanan Parsial Gas Buang Awal

Komponen	Jumlah mol	Tekanan awal (atm)
CO <sub>2</sub>	0,140	0,070
H <sub>2</sub> O	0,134	0,067
HCl	0,00004	0,0002
O <sub>2</sub>	0,201	0,101
N <sub>2</sub>	1,510	0,761
SO <sub>2</sub>	0,00003	0,0001
Cl <sub>2</sub>	0,00004	0,00002
SO <sub>3</sub>	0,000	0,000
Total	1,984	1,000

Berdasarkan reaksi kesetimbangan persamaan (7) dan (9), tekanan parsial dikoreksi sesuai dengan Tabel 4.10

Tabel 4. 10 Tekanan Parsial Gas Buang Koreksi

Komponen	Jumlah mol	tekanan parsial (atm)
CO <sub>2</sub>	0,070	(0,070)/N
H <sub>2</sub> O	0,067 + z	(0,067 + z)/N
HCl	0,00002 - 2z	(0,00002Z)/N
O <sub>2</sub>	0,101 - 0,5z - 0,5y	(0,1 - 0,5 z - 0,5 y)/N
N <sub>2</sub>	0,761	(0,761)/N
SO <sub>2</sub>	0,0001 -y	(0,0001 -Y)/N
HF	0	0
Br <sub>2</sub>	0	0
I <sub>2</sub>	0	0
Cl <sub>2</sub>	z	z/N
SO <sub>3</sub>	y	y/N
Total	1-0,5z-0,5y	1

Pada Tabel 4.9, z dan y adalah jumlah mol dalam kondisi setimbang. N adalah total jumlah mol pada gas buang dalam kondisi setimbang.  $N = 1-0,5z-0,5y$ . Dengan mensubstitusi tekanan parsial dan jumlahnya pada konstanta kesetimbangan di persamaan (8) dan (10) ke persamaan (11) dan (12), maka akan menghasilkan:

$$P(\text{CO}_2) = 0,140 / 1,984 = 0,070 \dots\dots\dots(21)$$

dan

$$0,04365 = (y) / ((0,00001-y) (0,1 - 0,5z - 0,5y)^{0,5} N^{0,5}) \dots\dots\dots(22)$$

Dimana

$$N = 1 - 0,5z - 0,5y$$

Basis: 1 mol gas buang sebelum terjadi reaksi kesetimbangan

Persamaan (18) dan (19) digunakan untuk menentukan nilai z dan y. Persamaan ini akan disederhanakan karena jumlah z dan y yang selisihnya kecil, sehingga menjadi:

$$0,03543 = \frac{(z)(0,067+z)}{(0,00002-2z)^2} (0,101 - 0,5z - 0,5y)^{0,5} \dots\dots\dots(23)$$

Dan

$$0,04365 = \frac{(y)}{(0,00001-y)} (0,1 - 0,5z - 0,5y)^{0,5} \dots\dots\dots(24)$$

Z dan y dapat dihitung melalui *trial and error*. Berdasarkan persamaan (20) dan (21), hasil z dan y adalah  $8,59 \times 10^{-5}$  dan  $4,11 \times 10^{-5}$  atm. Hasil koreksi tekanan parsial gas buang selanjutnya ada pada Tabel 4.11

Tabel 4. 11 Hasil Koreksi Tekanan Parsial Gas Buang

Komponen	Jumlah mol	Tekanan Parsial (atm)
CO <sub>2</sub>	0,070	0,0704
H <sub>2</sub> O	0,067	0,0673
HCl	0,0002	0,01408
O <sub>2</sub>	0,101	0,101
N <sub>2</sub>	0,761	0,7609
SO <sub>2</sub>	0,000026	0,00003
Cl <sub>2</sub>	0,0000859	0,0001
SO <sub>3</sub>	0,0000411	0,00004
Total	1,000	1,000

Komposisi gas buang pada Tabel 4.12 didapat berdasarkan konstanta pada persamaan stoikiometrik dan tekanan parsial yang ditunjukkan di Tabel 4.11. Komposisi ini bukan hasil akhir karena hasil perhitungan adalah berdasarkan suhu perkiraan insinerator yaitu 2191,57 °F atau 1199,76 °C

Tabel 4. 12 Komposisi Gas Buang

Komponen	%Mol	Lb mol	Mr	Lb	%Massa
CO <sub>2</sub>	7,037	1,396	44,010	61,442	10,731
H <sub>2</sub> O	6,754	1,336	18,016	24,077	4,205
HCl	1,413	0,000	36,458	0,013	0,002
O <sub>2</sub>	10,108	2,007	32,000	64,214	11,215
N <sub>2</sub>	76,113	15,100	28,000	422,806	73,843
SO <sub>2</sub>	0,003	0,000	64,060	0,019	0,003
Cl <sub>2</sub>	0,009	0,000	70,900	0,000	0,000
SO <sub>3</sub>	0,004	0,000	80,060	0,000	0,000
Total	101,435	19,840		572,572	100,000

Kemudian dihitung temperatur kerja dan konstanta kesetimbangan reaksi kimia yang sebenarnya. Temperatur kerja dapat dihitung menggunakan data kapasitas panas pada tiap komponen pada Tabel 4.13. Kolom kedua didasarkan pada 1 gram campuran sampah pada Tabel 4.13. Kapasitas panas sebagai fungsi temperature diambil dari kapasitas panas molar dan satuan dari kapasitas panas adalah kal/gmol-K (Kelley dkk.1960)

Tabel 4. 13 Kapasitas Panas Tiap Komponen

Komponen	gmole per gram sampah	a	b*10 <sup>3</sup>	c*10 <sup>-5</sup>	Δa	Δb	Δc
CO <sub>2</sub>	1,40E-02	10,57	2,1	-2,06	0,148	0,0000	-2875,941

H <sub>2</sub> O	1,34E-02	7,3	2,46	0	0,098	0,0000	0,000
HCl	3,64E-06	6,27	1,24	0,3	0,000	0,0000	0,109
O <sub>2</sub>	2,01E-02	7,16	1	-0,4	0,144	0,0000	-802,678
N <sub>2</sub>	1,51E-01	6,83	0,9	-0,12	1,031	0,0001	-1812,026
SO <sub>2</sub>	2,95E-06	11,04	1,88	-1,84	0,000	0,0000	-0,543
Cl <sub>2</sub>	1,82E-08	8,85	0,16	-1,8	0,000	0,0000	-0,003
SO <sub>3</sub>	2,95E-08	13,9	6,1	-3,22	0,000	0,0000	-0,009
Total					1,420	0,0002	-5491,091

Jika:  $\Delta a = \sum_i (\text{gmol}_i)(a_i)$ . dst..

Maka untuk sistem ini:

$$\Delta a = 1,42$$

$$\Delta b = 2 \cdot 10^{-4}$$

$$\Delta c = -0,549 \cdot 10^4$$

Persamaan (12) digunakan untuk mengevaluasi temperatur kerja sebenarnya karena adanya hal-hal ini yaitu:

1. Sampah, bahan bakar tambahan (apabila digunakan), dan udara dianggap memiliki suhu sama dengan suhu ambien
2. Kondisi pembakaran dianggap sebagai adiabatik (merupakan proses yang tidak ada kalor yang masuk atau keluar dari sistem ke lingkungan atau  $DQ=0$  karena terdapat sekat yang tidak menghantarkan kalor atau prosesnya berlangsung cepat)

Perlu dipahami bahwa NHV harus negatif (-8700,50 cal/g mol) karena sistem mengeluarkan energi selama proses pembakaran.

Persamaan (12) dilakukan secara *trial and error* sehingga menghasilkan:

$$T = 1391,53 \text{ } ^\circ\text{K} = 2045,084 \text{ } ^\circ\text{F} = 2504,754 \text{ } ^\circ\text{R} = 1118,53^\circ\text{C}$$

Konstanta kesetimbangan harus dihitung ulang pada data suhu yang baru dengan persamaan (7) dan (9). Hasilnya adalah:

$$K_1 = 0,047 \text{ atm}^{-1/2}$$

$$K_2 = 0,065 \text{ atm}^{-1/2}$$

Tekanan parsial dari komponen gas buang dihitung ulang menggunakan konstanta kesetimbangan yang lebih akurat. Komposisi gas buang akhir ditunjukkan pada Tabel 4.15. Untuk hasil yang lebih akurat, proses dapat diulang. Hasil akhir gas buang dapat dilihat pada Tabel 4.14. Laju alir massa dan laju alir molar dari gas buang dihitung dari hasil yang didapatkan pada Tabel 4.13. Laju alir volumetrik dihitung menggunakan hukum gas ideal ( $P = 1 \text{ atm}$ )

Tabel 4. 14 Komposisi Gas Buang Akhir

Laju alir massa (lb/jam)	128,516
Laju alir molar (Lbmol/hr)	4,374
R	0,730
Laju alir volumetrik (ft3/jam)	7999,827
Laju alir volumetrik (acfm)	133,330
Konsentrasi SO <sub>3</sub> (ppm)	31,173
Konsentrasi Cl <sub>2</sub> (ppm)	70,549

#### 4.5 Destruction Removal Efficiency

Selanjutnya menghitung DRE tiap variasi dengan menggunakan persamaan (1) sehingga menjadi

$$\begin{aligned} \text{DRE variasi 7 (\%)} &= \frac{10 \text{ kg} - 0,427 \text{ kg}}{10 \text{ kg}} \times 100\% \\ &= 95,73\% \end{aligned}$$

*Destruction Removal Efficiency* (DRE) dihitung dengan menggunakan persamaan (1) sehingga dapat diketahui pengaruh



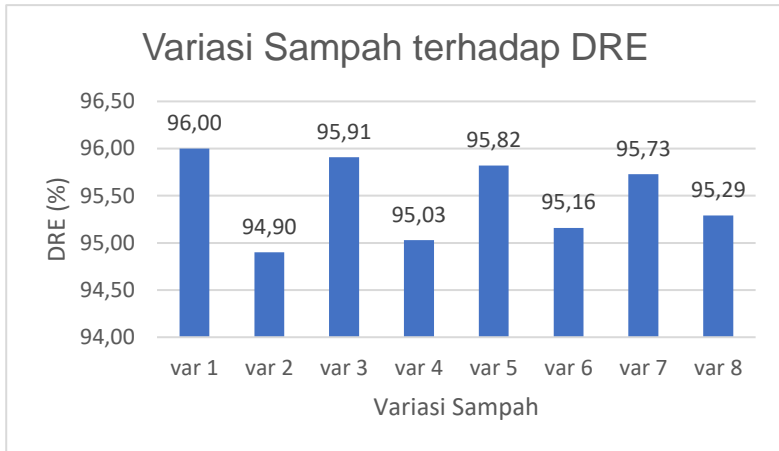
variasi jumlah PP dan kadar air sampah terhadap hasil pembakaran pada insinerator. Parameter yang diukur untuk analisis DRE adalah bobot limbah sisa pembakaran yang dihasilkan oleh proses pembakaran dan bobot limbah yang dibakar. Perhitungan DRE dapat dilihat pada lampiran B.

Hasil Perhitungan DRE masing-masing variasi dapat dilihat pada Tabel 4.15

Tabel 4. 15 Hasil Perhitungan DRE

Variasi	Komponen Sampah (%)				DRE (%)
	PP	Kain	Kayu	Kertas dan Kardus	
1	50	25	25	0	96,00
2	50	25	0	25	94,90
3	60	20	20	0	95,91
4	60	20	0	20	95,03
5	70	15	15	0	95,82
6	70	15	0	15	95,16
7	80	10	10	0	95,73
8	80	10	0	10	95,29

Grafik pengaruh variasi sampah terhadap DRE dapat dilihat pada Gambar 4.2



**Gambar 4. 2 Grafik Pengaruh Variasi jumlah PP dan kadar air sampah terhadap DRE**

Grafik pada Gambar 4.2 diatas menunjukkan DRE yang berbeda-beda dari tiap variasi sampah. Variasi antara jumlah PP dan kadar air sampah memperikan pengaruh terhadap hasil pembakaran sampah. Nilai DRE tertinggi ada pada variasi 1 dengan nilai 96% yang sampahnya terdiri dari 5 kg PP, 2,5 kg kain, 2,5 kg kayu, dan 0 kg kertas dan kardus. Variasi 1 menghasilkan nilai DRE paling tinggi dikarenakan berat abu setelah pembakaran pada variasi 1 ini paling kecil yaitu 0,4 kg. Sedangkan nilai DRE terendah adalah variasi 2 yaitu 94,90% yang komposisi sampahnya adalah 5 kg PP, 2,5 kg kain, 0 kg kayu, dan 2,5 kg kertas dan kardus. Hal ini terjadi karena berat abu hasil pembakaran pada sampah variasi 2 paling banyak yaitu 0,51 kg.

Sampah selain plastik PP yang sangat mempengaruhi perhitungan Destruction Removal Efficiency adalah sampah kayu karena memiliki kadar abu yang paling sedikit dibandingkan sampah lainnya yaitu 1%, kain 6,5%, dan kertas dan kardus 5% sehingga variasi 1 dengan sampah kayu yang paling banyak yaitu sebanyak 25% memiliki nilai DRE yang paling tinggi karena sampah kayu hanya menghasilkan abu yang sedikit. Menurut

Novita (2010), kadar abu menjadi parameter penting, dan bervariasi tergantung pada pengotor atau bahan tambahan tidak terbakar yang ada dalam kertas.

#### **4.6 Pengaruh Jumlah PP Terhadap Emisi dan Temperatur Insinerator**

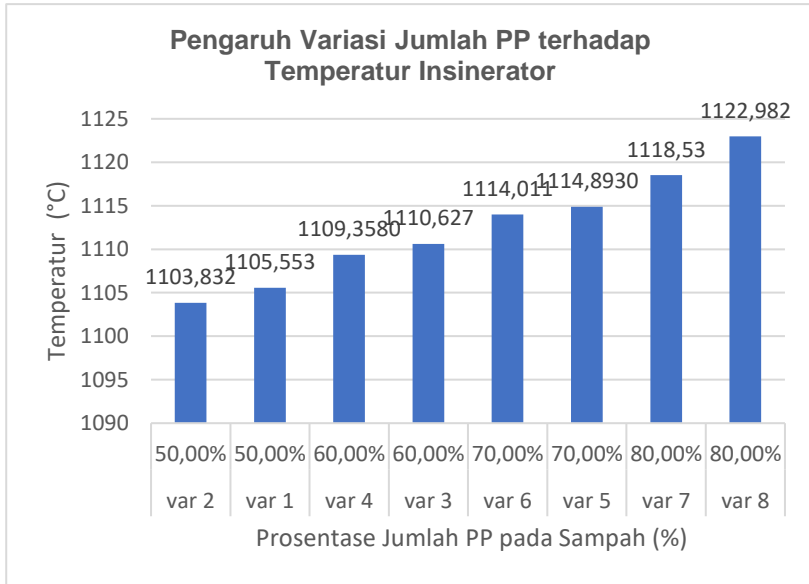
##### **4.6.1 Pengaruh Jumlah PP Terhadap Temperatur Insinerator**

Perubahan temperatur pembakaran sampah pada insinerator dengan variasi jumlah PP dapat dilihat pada Tabel 4.16

Tabel 4. 16 Hasil Perhitungan Temperatur dengan Variasi Jumlah PP

Variasi	Jumlah PP (%)	Temperatur (°C)
1	50,00%	1105,553
2	50,00%	1103,832
3	60,00%	1110,627
4	60,00%	1109,358
5	70,00%	1114,893
6	70,00%	1114,011
7	80,00%	1118,53
8	80,00%	1122,982

Grafik pengaruh variasi jumlah PP terhadap emisi insinerator dapat dilihat pada Gambar 4.3



Gambar 4. 3 Grafik Pengaruh Jumlah PP terhadap Temperatur Insinerator

Gambar 4.3 menunjukkan perbandingan temperatur pembakaran sampah dengan variasi jumlah sampah PP 50%, 60%, 70%, dan 80%. Temperatur pembakaran paling rendah dihasilkan dari variasi 2 dengan presentase jumlah PP sebanyak 50% yaitu sebesar 1103,832 °C dan temperatur pembakaran paling tinggi dihasilkan dari variasi 8 dengan presentase jumlah PP sebanyak 80% yaitu sebesar 1122,982 °C. Dari grafik diatas diketahui bahwa semakin tinggi jumlah plastik PP, maka semakin tinggi suhu ruang bakar insinerator. Hal ini terjadi karena PP memiliki kadar volatil yang cukup tinggi yaitu 93,77% (Hakeem,2018) yang menjadikan nilai kalor pembakaran menjadi sangat tinggi pula yaitu 46 MJ/kg sehingga mampu menaikkan temperatur pada ruang bakar insinerator.

Menurut Novita (2010) bagian dari materi yang memberikan kontribusi besar terhadap pembentukan nilai kalor

adalah materi volatil dan *fixed carbon*. Pengaruh sampah selain PP adalah sampah kertas dan kardus, dimana sampah tersebut memiliki kadar volatil yang tinggi yaitu 75,9%. Sehingga apabila dilihat pada variasi 7 dan 8 yang memiliki presentase sampah PP yang sama yaitu 80%, variasi 8 membakar kertas dan kardus sebanyak 10% sedangkan variasi 7 tidak membakar kertas dan kardus, melainkan membakar 10% kayu yang kadar volatilnya lebih rendah yaitu 68%.

Menurut Cheremisnoff (2010), Sampah industri kayu dan kertas menggunakan sebanyak 400.000 ton untuk proses insinerasi pada tahun 2006. Hal ini menyebabkan kenaikan sebesar 39% jumlah sampah kayu dan kertas yang terinsinerasi dibandingkan dari tahun 2004. Hal ini juga menyebabkan penurunan sebesar 10% sampah kayu dan kertas yang dibuang pada *landfill*. Sampah tekstil memiliki kadar volatil yang tinggi, yaitu >96% yang menjadikan nilai kalornya tinggi juga. HHV tekstil berkisar antara 4200-4800 kkal/kg kering dan LHV berkisar antara 4000-4600 kkal/kg. Sampah tekstil yang biasanya ada dalam jumlah banyak sangat berpotensi untuk dijadikan bahan bakar pada insinerator atau dijadikan *pellet Refused Derived Fuel*.

#### 4.6.2 Pengaruh Jumlah PP Terhadap Emisi Gas Buang Insinerator

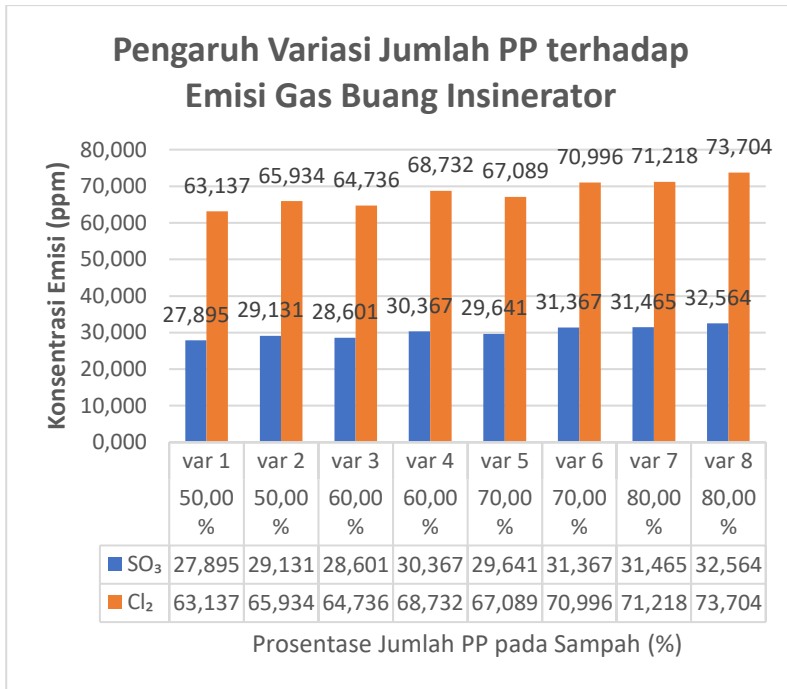
Perubahan emisi gas buang dari pembakaran sampah pada insinerator dengan variasi jumlah PP dapat dilihat pada Tabel 4.17

Tabel 4. 17 Hasil Perhitungan Emisi Gas Buang dengan Variasi Jumlah PP

Variasi	Jumlah PP (%)	SO <sub>3</sub> (ppm)	Cl <sub>2</sub> (ppm)
var 1	50,00%	27,895	63,137
var 2	50,00%	29,131	65,934
var 3	60,00%	28,601	64,736
var 4	60,00%	30,367	68,732
var 5	70,00%	29,641	67,089
var 6	70,00%	31,367	70,996

var 7	80,00%	31,465	71,218
var 8	80,00%	32,564	73,704

Grafik pengaruh variasi jumlah PP terhadap emisi gas buang insinerator dapat dilihat pada Gambar 4.4



Gambar 4. 4 Grafik Pengaruh Jumlah PP terhadap Emisi Gas Buang Insinerator

Gambar 4.4 menunjukkan konsentrasi SO<sub>3</sub> dan Cl<sub>2</sub> paling rendah dihasilkan oleh variasi 1 dengan presentase jumlah PP 50% dengan nilai 27,895 ppm untuk SO<sub>3</sub> dan 63,137 ppm untuk Cl<sub>2</sub>. Sedangkan konsentrasi paling tinggi dihasilkan oleh variasi 8

dengan presentase jumlah PP 80% dengan nilai 32,564 ppm untuk SO<sub>3</sub> dan 73,704 ppm untuk Cl<sub>2</sub>. Dari grafik diatas diketahui bahwa semakin tinggi jumlah plastik PP, maka semakin tinggi konsentrasi SO<sub>3</sub> dan Cl<sub>2</sub>. Hal ini terjadi karena kandungan volatil PP yang tinggi membuat waktu kerja insinerator menjadi semakin lama sehingga dapat meningkatkan konsentrasi gas buang insinerator.

Berdasarkan literatur yang ada, sampah PP tidak memiliki kandungan klor dan hanya memiliki kandungan sulfur yang cukup rendah yaitu hanya 0,01%, namun kandungan klor dan sulfur diperoleh dari sampah lain yaitu kain yang memiliki kandungan sulfur sebanyak 0,13% dan klor sebanyak 0,65%; sampah kayu yang memiliki kandungan sulfur sebanyak 0,29%; dan sampah kertas dan kardus yang memiliki kandungan sulfur sebanyak 0,2% dan klor sebanyak 0,19%.

Menurut Cheremisnoff (2010), industri kayu dan kertas merupakan kontributor terbesar ketiga dalam penghasil emisi terbesar daripada industri lainnya. Sektor *pulp* dan *paper* menghasilkan 198,8 juta *metric ton* CO<sub>2</sub>. Adanya unsur klor pada kertas dan kayu berasal dari proses *bleaching* (pemutihan) pada industri kertas yang menggunakan *elemental chlorine*. Penggunaan *elemental chlorine* ini dapat menghasilkan dioksin dalam jumlah besar. Dioksin adalah salah satu bahan kimia beracun apabila dilepaskan pada atmosfer. Data dari *National Emission Trends* (1999) menunjukkan bahwa industri kayu dan kertas menghasilkan VOCs sebanyak 201,318 ton per tahun, nitrogen oksida (NO<sub>x</sub>) sebanyak 325,958 ton per tahun, *particulate matter* (PM 2,5) sebanyak 65,237 ton per tahun, dan polutan berbahaya lainnya sebanyak 23,952 ton per tahun. Menurut Oguntoke (2013), insinerasi 1 kg kayu dapat melepaskan asap yang mengandung 32523-40284 µg/m<sup>3</sup> PM<sub>0,3-0,5</sub>, 1 ppm NO<sub>2</sub>, 3,3 ppm SO<sub>2</sub>, 759 ppm CO, 800 µg/m<sup>3</sup> benzene dan 700 µg/m<sup>3</sup> formaldehid ke udara ambien.

## 4.7 Pengaruh Kadar Air Sampah Terhadap Emisi dan Temperatur Insinerator

### 4.7.1 Pengaruh Kadar Air Sampah Terhadap Temperatur Insinerator

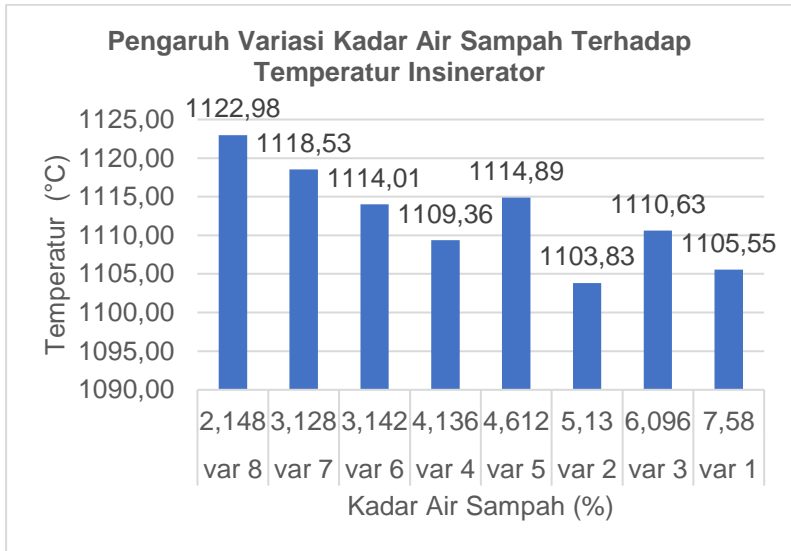
Perubahan temperatur dari pembakaran sampah pada insinerator dengan variasi kadar air sampah dapat dilihat pada Tabel 4.18

Tabel 4. 18 Hasil Perhitungan Temperatur dengan Variasi Kadar Air Sampah

Variasi	Kadar Air Sampah (%)	Temperatur (°C)
1	7,58	1105,553
2	5,13	1103,832
3	6,096	1110,627
4	4,136	1109,358
5	4,612	1114,893
6	3,142	1114,011
7	3,128	1118,53
8	2,148	1122,982

Grafik pengaruh kadar air sampah terhadap temperatur insinerator dapat dilihat pada Gambar 4.5





Gambar 4. 5 Grafik Pengaruh Kadar Air Sampah terhadap Temperatur Insinerator

Gambar 4.5 menunjukkan bahwa variasi 8 dengan kadar air sampah 2,148% menghasilkan temperatur kerja insinerator paling tinggi yaitu 1122,982 °C dan variasi 2 dengan kadar air sampah 5,13% menghasilkan temperatur kerja paling rendah yaitu 1103,8 °C. Dari grafik diatas diketahui bahwa semakin tinggi kadar air sampah, maka terjadi kecenderungan penurunan temperatur pada ruang bakar insinerator walaupun hasil temperatur pembakaran tidak selalu turun . Karena pada teorinya, hal ini terjadi karena energi panas pembakaran terlebih dahulu menguapkan kandungan air pada sampah yang menyebabkan proses pembakaran menjadi kurang maksimal sehingga kelembapan sampah yang tinggi ini dapat mengurangi nilai pemanasan dan berakibat mengurangi efisiensi konversi dan kerja insinerator, karena sejumlah besar energi panas akan digunakan untuk penguapan sehingga dapat mencegah keberlanjutan pembakaran (Han dkk, 2014).

Menurut Novita (2010), kadar air berdasarkan fraksi kering menjadi faktor pengurang nilai kalor yang sangat besar dalam pembakaran sampah. Kadar air yang tinggi pada sampah dapat memperpanjang proses pengeringan bahan bakar sehingga melemahkan proses pembakaran. Sampah dengan kapasitas higroskopik (kemampuan suatu zat untuk menyerap molekul air dari lingkungannya) yang tinggi akan lebih mudah mempengaruhi proses pembakaran. Kertas memiliki kadar air yang rendah (4-9%), namun karena sifatnya yang mudah menyerap air hujan, cairan hasil dekomposisi, serta dapat menyerap minyak, kadar air sampah di TPA dapat mencapai 44%. Kertas terbuat dari selulosa atau serat kayu yang dicampur dengan bahan kimia sebagai pengisi atau penguat kertas. Serat kayu ini yang akan terbakar dan memberikan nilai kalor. Namun keberadaan bahan pengisi, penguat, atau materi inorganik lainnya tidak berkontribusi pada panas pembakaran. Nilai kalor kertas terhitung tinggi dan sangat berpotensi untuk dibakar pada insinerator atau dijadikan *pellet Refused Derived Fuel*.

Sampah tekstil yang banyak dijumpai di tempat pembuangan adalah yang tidak layak didaur ulang lagi. Tekstil di sumber memiliki kadar air yang kecil, namun bahan ini sangat baik dalam menyerap air, sehingga kebanyakan tekstil yang masuk TPA sudah dalam keadaan basah. Menurut Zamani (2014), jumlah energi yang dihasilkan dari proses insinerasi sampah tekstil dapat dijadikan alternatif untuk produksi panas dan listrik. Dengan proses insinerasi, energi yang dapat dimanfaatkan Kembali dapat mencapai 60% dari energi yang dibutuhkan untuk memproduksi produk tekstil tersebut (Bartl, 2011).

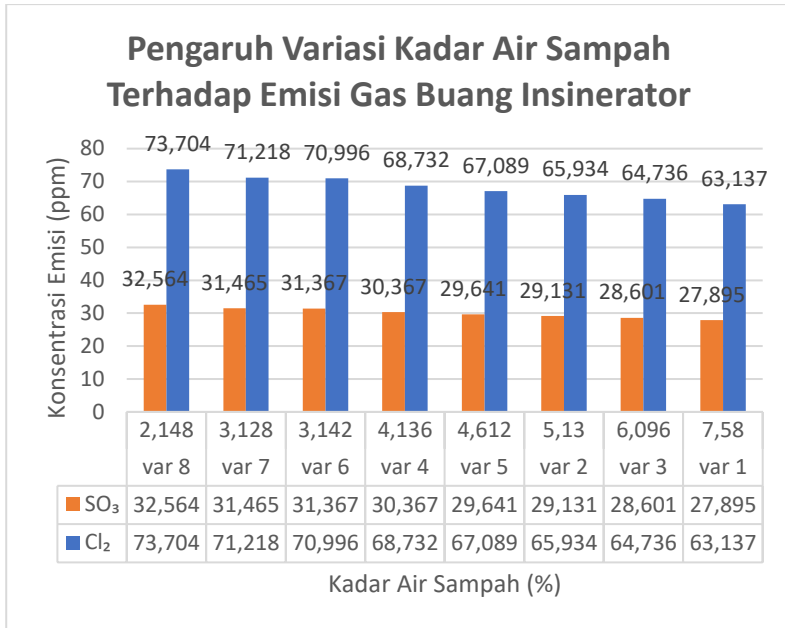
#### 4.7.2 Pengaruh Kadar Air Sampah Terhadap Emisi Gas Buang Insinerator

Perubahan emisi gas buang dari pembakaran sampah pada insinerator dengan variasi kadar air sampah dapat dilihat pada Tabel 4.19

Tabel 4. 19 Hasil Perhitungan Emisi Gas Buang pada Variasi Kadar Air Sampah

Variasi	Kadar Air Sampah (%)	SO <sub>3</sub> (ppm)	Cl <sub>2</sub> (ppm)
1	7,58	27,895	63,137
2	5,13	29,131	65,934
3	6,096	28,601	64,736
4	4,136	30,367	68,732
5	4,612	29,641	67,089
6	3,142	31,367	70,996
7	3,128	31,465	71,218
8	2,148	32,564	73,704

Grafik pengaruh kadar air sampah terhadap emisi gas buang insinerator dapat dilihat pada Gambar 4.6



Gambar 4. 6 Grafik Pengaruh Kadar Air Sampah terhadap Emisi gas buang Insinerator

Gambar 4.6 menunjukkan emisi SO<sub>3</sub> dan Cl<sub>2</sub> paling tinggi dihasilkan dari pembakaran sampah variasi 8 dengan kadar air sampah paling rendah yaitu 2,148% dengan nilai 32,564 ppm untuk SO<sub>3</sub> dan 73,704 ppm untuk Cl<sub>2</sub>. Sedangkan emisi paling rendah dihasilkan dari pembakaran sampah variasi 1 dengan kadar air sampah paling tinggi yaitu 7,58% dengan nilai 27,895 ppm untuk SO<sub>3</sub> dan 63,137 ppm untuk Cl<sub>2</sub>. Dari grafik diatas diketahui bahwa semakin tinggi kadar air sampah, maka semakin rendah konsentrasi SO<sub>3</sub> dan Cl<sub>2</sub> pada ruang bakar insinerator. Hal ini terjadi karena kenaikan kadar air membatasi keluarnya gas-gas hitam berbahaya dari insinerator (Liang dkk, 2008). Menurut Naryono dkk, 2013, semakin tinggi kandungan air sampah, maka semakin sulit dan lama terjadinya reaksi pembakaran dan semakin tinggi kandungan air, maka semakin tidak sempurna reaksi pembakaran yang terbentuk.

Selain karena kadar air PP yang sangat rendah yaitu 0,16%, variasi kadar air dipengaruhi oleh sampah lain yaitu sampah kain yang memiliki kadar air sebanyak 10%; sampah kayu sebanyak 20%; sampah kertas dan kardus sebanyak 10,2%. Menurut Zamani (2014), mayoritas produk tekstil mengandung bahan polimer alami dan sintetis seperti kapas, *polyester*, nilon, dan *polypropylene*. Insinerasi tekstil menghasilkan hingga 230 kg CO<sub>2</sub> per ton sampah tekstil. *Polyvinyl chloride* (PVC), *polystyrene* (PS), dan potongan kayu menghasilkan konsentrasi CO yang tinggi saat diinsinerasi dikarenakan kadar volatilnya yang juga tinggi. Pada insinerator *fluidized bed*, konsentrasi CO dan NO<sub>x</sub> menurun dengan naiknya kadar air sampah, sehingga menunjukkan bahwa molekul H<sub>2</sub>O memberi efek positif pada pembakaran.

**“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”**

## BAB 5

### PENUTUP

#### 5.1 Kesimpulan

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

1. Variasi Jumlah PP dari 50% hingga 80% dan kadar air sampah dari 2,148% hingga 7,58% berpengaruh pada perubahan temperatur pembakaran insinerator yang dihasilkan. Temperatur paling rendah dihasilkan oleh jumlah PP 50% dan kadar air 5,13% yaitu sebesar 1103,832 °C sedangkan temperatur paling tinggi dihasilkan oleh jumlah PP 80% dan kadar air 2,148% yaitu sebesar 1122,98 °C. Peningkatan jumlah PP mengakibatkan temperatur pembakaran juga meningkat. Semakin tinggi kandungan kadar air sampah, temperatur pembakaran akan semakin menurun.
2. Variasi Jumlah PP dari 50% hingga 80% dan kadar air sampah dari 2,148% hingga 7,58% berpengaruh pada perubahan konsentrasi emisi gas buang insinerator. Konsentrasi paling rendah dihasilkan oleh jumlah PP 50% dan kadar air 7,58% yaitu sebesar 27,895 ppm SO<sub>3</sub> dan 63,137 ppm Cl<sub>2</sub> sedangkan konsentrasi paling tinggi dihasilkan oleh jumlah PP 80% dan kadar air 2,148% yaitu sebesar 32,564 ppm SO<sub>3</sub> dan 73,704 ppm Cl<sub>2</sub>. Peningkatan jumlah PP mengakibatkan emisi gas buang SO<sub>3</sub> dan Cl<sub>2</sub> meningkat. Semakin tinggi kadar air sampah, emisi gas buang akan semakin menurun.
3. *Destruction Removal Efficiency* (DRE) dari masing-masing variasi sampah yang dibakar pada insinerator berbeda-beda, dengan DRE paling tinggi adalah variasi 1 yaitu 96% dengan presentase jumlah sampah 50% PP, 25% kain, dan 25% kayu. dan DRE paling rendah adalah variasi 2 yaitu 94,9% dengan presentase jumlah sampah 50% PP, 25% kain, dan 25% kardus dan kertas.

## **5.2 Saran**

Saran yang dapat diberikan untuk penelitian yang dilakukan selanjutnya sebaiknya sampah lebih divariasikan lagi untuk mendapatkan hasil yang lebih variatif. Energi panas yang dihasilkan pembakaran sampah mungkin bisa diteliti lebih lanjut sebagai konsep *waste to energy*.



## DAFTAR PUSTAKA

- Arsad, A., H, Sulaiman.,, A.R. Rachmat. 2006. "Combustion Behaviour of Poultry and Plastic Waste in as Bench Scale Combustor". **University of Technology Malaysia**.
- Bartl, A. 2011. "Waste: A Handbook for Management." **Academic Press**. Elsevier Inc. pages 167-179.
- Billmeyer, F. W. 1971. **Textbook of Polymer Science**. New York: John Wiley & Sons.
- Biz, A. 2019. "Proses Termodinamika Isobarik, Isothermal, Isokorik, dan Adiabatik." <URL:<https://ardra.biz/tag/pengertian-proses-adiabatik/>> diakses pada 13 Mei 2020.
- Budiman, A. 2001. "Modifikasi Desain dan Uji Unjuk Kerja Alat Pembakar Sampah (Incinerator) Tipe Batch" **Skripsi. Teknik Pertanian**. Fakultas Teknologi Pertanian IPB.
- Boettner, E. A., Ball, G. L., Weiss, B. 1973. "Combustion Products From The Incineration of Plastics." **Michigan University. National Technical Information Service**.
- Chang, Y.F., Lin, C.J., Chyan, J.M., Chen, I. M. dan Chang, J.E. 2007. "Multiple Regression Model for the Lower Heating Value of Municipal Solid Waste in Taiwan". **Journal of Environmental Management** 85: 891-899.
- Cheremisinoff, P. N. 1987. "Waste Incineration Handbook." Oxford: **Butterworth-Heinemann**.
- Cheremisinoff, P. N. 2010. "Handbook of Pollution Prevention and Cleaner Production Vol. 2." **Elsevier inc**.
- Courtemanche B., Levendis, Y.A., 1998. "A laboratory study on the NO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, and CO<sub>2</sub> emissions from the Combustion of Pulverized Coal, Municipal waste plastics, and Tires." **Department of Mechanical, Industrial, and Manufacturing Engineering**. Fuel vol 77, number 3.

- Czuros, M. 1997. "Environmental Sampling and Analysis: Lab Manual." Florida: **CRC Press**.
- Damanhuri, E., Padmi, T. 2006. Diktat Kuliah TL-3150. Pengelolaan Sampah. **Teknik Lingkungan. ITB**.
- Damanhuri, E. 2006. "Perolehan Kembali Materi-Energi dari Sampah." **Teknik Lingkungan. FTSL. ITB**.
- Eddy dan Budi. 1990. "Teknik Pembakaran Dasar dan Bahan Bakar" **Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri ITS**.
- Fadly, N.T. 2014. "Menentukan Konsentrasi NaOH Sebagai Penyerap CO<sub>2</sub> dari Proses Pembakaran Limbah *Secondary Chamber*." **Thesis. Politeknik Negeri Sriwijaya**.
- Geyer, R., Jambeck, J. R., Law, K. L. 2017. "Production, Use, and Fate of All Plastics Ever Made" **American Association for the Advancement of Science** 3, e1700782
- Globesnewswire. 2020. Howard, B. C., Abdelrahman, A. M. 2020. "Exactly What Every Plastic Recycling Symbol Actually Means." <URL: <https://www.goodhousekeeping.com/home/g804/recycling-symbols-plastics-460321/#slide-1/>> diakses pada 3 Juli 2020.
- Greeneration, 2018. "Apakah Insinerator Jadi Solusi Yang Tepat?" <URL: <https://www.greeneration.org/apakah-insinerator-jadi-solusi-yang-tepat/>> diakses pada 24 Juli 2020.
- Han, J., Shimizu, T., Wataru, M., Kim, H., Wang, G. "Polypropylene Combustion in a Fluidized Bed Combustor." **Energy Sources part A**, 32:1121-1129.
- Hidayah, E. N. 2007. "Uji Kemampuan Pengoperasian Insinerator Untuk Mereduksi Limbah Klinis Rumah Sakit Umum Haji Surabaya" **Jurnal Rekayasa Perencanaan UPN "Veteran" Jatim** 4,1.

- Howard, B. C., Abdelrahman, A. M. 2020. "Exactly What Every Plastic Recycling Symbol Actually Means." <URL: <https://www.goodhousekeeping.com/home/g804/recycling-symbols-plastics-460321/#slide-1/>> diakses pada 3 Juli 2020.
- Hutagalong, M, 2007. **Teknologi Pengolahan Sampah**. <URL: <https://depokbebassampah.wordpress.com/artikel/michael-hutagalung/>> diakses pada 20 Februari 2020.
- John, S. E., Swamy, C. N. 2011. "Design of Incinerator for the Treatment of Biomedical Solid Waste in Chikmagalur City." **Journal of Industrial Pollution Control**. India
- Kaiser, E. R. 1964. "Combustion and Heat Calculaticon for Incinerators." **Proceeding of National Incinerator Conference**. New York, 81-9 PP.
- Kelley, K., Bur, U., Mines Bull. 1960. "S<sub>2</sub>O Above Room Temperatur with the Heat Capacity and Entropy Data for Solid S<sub>2</sub>S from Zero to; 298.
- Kikuchi, R. 2001. "Environmental Management of Sulphur Trioxide Emission: Impact of SO<sub>3</sub> on Human Health" **Environmental Management** 27, 837-844.
- Kirwan, M. J., Plant, S., Strawbridge, J. W. 2011. **Food and Beverage Packaging Technology, Second Edition**. Blackwell Publishing Ltd.
- Lee, H., Yi, S. M., Holsen, T. M., Seo, Y. S., Choi, E. 2017. "Estimation of CO<sub>2</sub> Emissions from Waste Incinerators: Comparison of Three Methods." **Waste Management Journal**.
- Lewandowski, D. A. 2000. "Design of Thermal Oxidatium Systems for Volatile Organic Compounds." **CRC Press LLC**.
- Li, Q., Zhang, Y. G., Chen, C. H., Dang, W. D. 2008. "Experimental Study of Moisture Impact on Municipal Solid Waste Incineration." **Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering** 28(8):58-64

- Liang, L., Sun, R., Fei, J. Wu, S., Liu, X., Dai, K., Yao, N. 2008. "Experimental Study on Effects of Moisture Content on Combustion Characteristics of simulated municipal solid wastes in a Fixed Bed." **Bioresource Technology** 99 (2008) 7238-7246.
- Listiyanawati, D. 2008. "Eko Briket dari Sampah Plastik dan Lignuselulosa Sebagai Alternatif Bahan Bakar". **Tesis. Jurusan Teknik Lingkungan**. Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, ITS, Surabaya.
- Lucas, I. 2018. **Understanding the Plastic Recycling Symbols (Types of Plastics)**. <URL <https://lowimpactmovement.org/all-in-week-1/2018/10/4/understanding-the-plastic-recycling-symbols-types-of-plastics>> diakses pada 19 Februari 2020.
- Maddah, H. A. 2016. "Polypropylene As A Promising Plastic: A Review". **American Journal of Polymer Science**, 6(1): 1-11
- Manyele, S. V., Kagonji, I. S. 2012. "Analysis of Medical Waste Incinerator Performance Based on Fuel Consumption and Cycle Times." **Departement of Chemical and Mining Engineering**. University of Dar es Salaam, Tanzania.
- M. El-Wakil. 1992. **Instalasi Pembangkit Daya Jilid 1**. Jakarta: Erlangga.
- Nabizadeh, R., Atafar, Z., Faraji, M. 2016. "Spreadsheet Model to Design of Hazardous Waste Incinerators." **Journal of Air Pollution and Health (Autumn 2016)**; 1 (4):209-280.
- Naryono, E., Atikah., Rachmansyah, A., Soemarno. 2015. "Simulasi dan Evaluasi Insinerasi Sampah Organik Rumah Tangga pada Reaktor Unggun Tetap (Fixed Bed)" **Indonesian Green Technology Journal** : 28-35.
- Nidoni, P. G. 2017. "Incineration Process for Solid Waste Management and Effective Utilization of Byproducts"

**International Research Journal of Engineering and Technology** 4, 12: 378-382.

- Novita, P. M., Damanhuri, E. 2010. "Perhitungan Nilai Kalor Berdasarkan Komposisi dan Karakteristik Sampah Perkotaan di Indonesia dalam Konsep Waste to Energy." **Jurnal Teknik Lingkungan ITB**, vol. 16:2 (103-114).
- Nzihou, J. F., Hamidon, S., Bonda, M., Koulidiati, B., Segda, G. 2014. "Using Dulong and Vandralet Formulas to Estimate the Colorfic Heating Value of a Household Waste Model." **International Journal of Scientific & Engineering Research**, vol. 5 (1).
- Oguntoke, O., Otusanya O. K., Annegarn, H. J., 2013. "Emission of Pollutants from Wood Waste Incineration at Sawmills in Abeokuta Metropolis, Nigeria." **International Journal of Environmental studies**. Vol 70(6): 964-975.
- Omnexus. 2018. "The Definitive Guide to Polypropylene (PP)." <URL: <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polypropylene-pp-plastic/>> diakses pada 3 Juli 2020.
- Panagiotou, T., Levendis, Y. 1994. "A Study on the Combustion Characteristics of PVC, Poly(styrene), Poly(ethylene), and Poly(propylene) Particles under High Heating Rates." **Department of Mechanical Engineering, Combustion and Flame** 99:53-74
- Pradipta, A. N. G., 2011. "Desain dan Uji Kinerja Alat Pembakar Sampah (Insinerator) Tipe Batch Untuk Perkotaan Dilengkapi dengan Pemanas Air." **Tugas Akhir** Institut Pertanian Bogor.
- Puspita, S. 2018. **Indonesia Penyumbang Sampah Plastik Terbesar Kedua di Dunia**. <URL: <https://megapolitan.kompas.com/read/2018/08/19/21151811/indonesia-penyumbang-sampah-plastik-terbesar-kedua-di-dunia>> diakses pada 20 Februari 2020.
- Purwaningsih, M. R. 2012. "Analisis Biaya Manfaat Sosial Keberadaan Pembangkit Listrik Tenaga Sampah Gedebage

Bagi Masyarakat Sekitar” **Jurnal Perencanaan Wilayah dan Kota** 23, 3:225-240.

- Rhohman, F., Ilham, M. M. 2019. “Analisa dan Evaluasi Rancang Bangun Insinerator Sederhana dalam Mengelola Sampah Rumah Tangga.” **Jurnal Mesin Nusantara**, vol. 2 no. 1:52-60.
- Santoleri, J. J., Reynolds, J., Theodore, L. 2000. “Introduction to Hazardous Waste Incineration: Second Edition.” Kanada: **John Wiley & Sons, Inc.**
- Subramanian, P. M. 2000. “Plastics Recycling and Waste Management in the U.S.” **Resources, Conservation and Recycling**, 28:253-263.
- Sun, R., Ismail, T. M., Ren, X., Salam, M. A. 2016. “Effect of Ash Content on the Combustion Process of Simulated MSW in the Fixed Bed.” **Waste Management**:236-249
- Syamsiro, M., Hadiyanto, A. N., dan Mufrodi, Z. (2016). “Rancang Bangun Mesin Pencacah Plastik Sebagai Bahan Baku Mesin Pirolisis Skala Komunal”. **Jurnal Mekanika dan Sistem Termal (J)** 1 (2): 43-48
- Syarief, R., Winarno, F, G., Kuntoro, S. 1989. “Studi Migrasi Bahan Aditif Plastik pada Penggunaan Pangan” **Laporan Penelitian Laboratorium Rekayasa Pangan PAU Pangan dan Gizi IPB.**
- Taufiq. 2008. “Perbandingan Temperatur Ring Stainless Steel dan Temperatur Ring Keramik Pada Fenomena Flame Lift-Up.” **Tugas Akhir.** Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
- Thaariq, J. 2018. “Kajian Pembakaran *Low Emission* dan *Low Energy* Pada Sistem Insinerasi Sampah Plastik Unusable.” **Thesis.** Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Tchobanoglous, G., Theisen, H., dan Vigil, S.A. 1993. **Integrated Solid Waste Management. Engineering Principles and Management Issues.** New York: McGraw Hill International Editions.

- Wakhyono, S. 2018. **Indonesia Sumbang Sampah Plastik Terbanyak Nomor 2 Dunia.** <URL: <https://fajar.co.id/2018/08/21/indonesia-sumbang-sampah-plastik-terbanyak-nomor-2-dunia/>>.
- Wiradarma. 2002. "The Energy Potency of Municipal Solid Waste to Supply Electricity in Mataram Regency". **Rekayasa** 3,1. Universitas Mataram. Mataram.
- World Economic Forum, 2018. "If You Recycled All The Plastic Waste On The Planet, You Would Be The World's Richest Person." <URL: <https://www.weforum.org/agenda/2018/12/if-you-recycled-all-the-plastic-garbage-in-the-world-you-could-buy-the-nfl-apple-and-microsoft>>
- White, C.W., Martin, J. G. 2010. "Chlorine Gas Inhalation: Human Clinical Evidence of Toxicity and Experience in Animal Models." **Proceeding of American Thoracic Society** 7: 257-263
- Wiyono, E., 2016. "Proses Pembakaran Sampah Kota Sebagai Sumber Energi Alternatif", **Disertasi**, Universitas Gajah Mada, Yogyakarta.
- Wu, H., H. Li, Z. Zhao, 2009. "Thermogravimetric Analysis and Pyrolytic Kinetic Study on Coal/Biomass Biends." **Journal of Fuel Chemistry Technology**. 37: 538-45.
- Yulistiani, F. 2009. "Kajian Tekno Ekonomi Pabrik Konversi Biomassa Menjadi Bahan Bakar Fischer-Tropsch Melalui Proses Gasifikasi" **Metodologi dan Usulan Penelitian, Program Studi Teknik Kimia**, Institut Teknologi Bandung.
- Yuntewi, E. A. T., Mac Carty, N., Ertel, J. 2008. "Laboratory Study of the Effects of Moisture Content on Heat Transfer and Combustion Efficiency of Three Biomass Cook Stoves." **Energy for Sustainable Development**. Vol. XII no. 2.
- Yuwono, A. S, dkk. 2009. "Rancang Bangun dan Produksi Opacity Meter Berbasis Bahan Lokal Serta Penyusunan dan

Pembakuan Sistem Kalibrasi”, **Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan**: IPB.

Zamani, B. 2014. “Carbon Footprint and Energy Use of Textile Recycling Techniques Case Study: Sweden.” **Master of Science Thesis**. Department of Chemical and Biological Engineering, Chalmers University of Technology Goteborg, Sweden.

Zhou, H., Meng, A., Long, Y., Zhang, Y. 2014. “Classification and Comparison of Municipal Solid Waste Based on Thermochemical Characteristics.” **Journal of the Air & Waste Management Association**, 64(5):597-616.



## LAMPIRAN

### I. Perhitungan Proximate dan Ultimate Analysis tiap variasi

#### Variasi 1

Komposisi Sampah	Jumlah Sampah (%)	Berat Sampah (kg)	Berat air (kg)	Berat Kering (kg)	Komposisi Dry Basis (kg)					
					C	H	O	N	S	Cl
PP	50,00%	5	0,0080	4,9920	4,24	0,70	0,0479	0,0040	0,0005	0,00
kain	25,00%	2,5	0,2500	2,2500	1,07	0,14	1,0157	0,0185	0,0029	0,01
kayu	25,00%	2,5	0,5000	2,0000	0,97	0,13	0,8940	0,0008	0,0058	0,00
kertas dan	0,00%	0	0,0000	0,0000	0,00	0,00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
Total		10,00	0,76	9,24	6,28	0,97	1,96	0,02	0,01	0,01

Komponen	Massa Dry Basis (kg)	%
C	6,281	62,81
H	0,970	9,70
O	1,958	19,58
N	0,023	0,23
S	0,009	0,09
Cl	0,015	0,15

Element	%w/w	Lb/hr	Aw (Atomic Weight)	Lb-Atom	%Atom
C	62,81	13,84725442	12,01	1,15	32,49
H	9,70	2,137438184	1,01	2,12	59,76
Cl	0,15	0,032242275	35,45	0,0009	0,03
S	0,09	0,020335671	32,06	0,0006	0,02
O	19,58	4,315665877	16,00	0,27	7,60
N	0,23	0,051242841	14,00	0,00	0,10
Total		20,40417927		3,55	100,00

## Variasi 2

Komposisi Sampah	Jumlah Sampah (%)	Berat Sampah (kg)	Berat air (kg)	Berat Kering (kg)	Komposisi Dry Basis (kg)					
					C	H	O	N	S	Cl
PP	50,00%	5	0,0080	4,9920	4,24	0,70	0,0479	0,0040	0,0005	0,00
kain	25,00%	2,5	0,2500	2,2500	1,07	0,14	1,0157	0,0185	0,0029	0,01
kayu	0,00%	0	0,0000	0,0000	0,00	0,00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
kertas dan kardus	25,00%	2,5	0,2550	2,2450	1,02	0,14	1,0709	0,0045	0,0045	0,00
Total		10,00	0,51	9,49	6,34	0,98	2,13	0,03	0,01	0,02

Komponen	Massa Dry Basis (kg)	%
Cl	6,336	63,36
H	0,977	9,77
O	2,134	21,34
N	0,027	0,27
S	0,008	0,08
Cl	0,019	0,19

Element	%w/w	Lb/hr	Aw (Atomic)	Lb-Atom	%Atom
C	63,36	13,96735	12,01	1,16	32,30
H	9,77	2,154882081	1,01	2,14	59,37
Cl	0,19	0,041645996	35,45	0,0012	0,03
S	0,08	0,017447645	32,06	0,0005	0,02
O	21,34	4,705582456	16,00	0,29	8,17
N	0,27	0,059377815	14,00	0,00	0,12
Total		20,946286		3,60	100,00

### Variasi 3

Komposisi Sampah	Jumlah Sampah (%)	Berat Sampah (kg)	Berat air (kg)	Berat Kering (kg)	Komposisi Dry Basis (kg)					
					C	H	O	N	S	Cl
PP	60,00%	6	0,0096	5,9904	5,09	0,83	0,0575	0,0048	0,0006	0,00
kain	20,00%	2	0,2000	1,8000	0,86	0,11	0,8125	0,0148	0,0023	0,01
kayu	20,00%	2	0,4000	1,6000	0,77	0,11	0,7152	0,0006	0,0046	0,00
kertas dan kardus	0,00%	0	0,0000	0,0000	0,00	0,00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
Total		10,00	0,61	9,39	6,72	1,05	1,59	0,02	0,01	0,01

Komponen	Massa Dry Basis (kg)	%
Cl	6,723	67,23
H	1,054	10,54
O	1,585	15,85
N	0,020	0,20
S	0,008	0,08
Cl	0,012	0,12

Element	%w/w	Lb/hr	Aw (Atomic Weight)	Lb-Atom	%Atom
C	67,23	14,82050745	12,01	1,23	32,81
H	10,54	2,323169385	1,01	2,30	61,27
Cl	0,12	0,02579382	35,45	0,0007	0,02
S	0,08	0,016708752	32,06	0,0005	0,01
O	15,85	3,494793296	16,00	0,22	5,81
N	0,20	0,044515989	14,00	0,00	0,08
Total		20,72548869		3,76	100,00

## Variasi 4

Komposisi Sampah	Jumlah Sampah (%)	Berat Sampah (kg)	Berat air (kg)	Berat Kering (kg)	Komposisi Dry Basis (kg)					
					C	H	O	N	S	Cl
PP	60,00%	6	0,0096	5,9904	5,09	0,83	0,0575	0,0048	0,0006	0,00
kain	20,00%	2	0,2000	1,8000	0,86	0,11	0,8125	0,0148	0,0023	0,01
kayu	0,00%	0	0,0000	0,0000	0,00	0,00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
kertas dan kardus	20,00%	2	0,2040	1,7960	0,82	0,11	0,8567	0,0036	0,0036	0,00
Total		10,00	0,41	9,59	6,77	1,06	1,73	0,02	0,01	0,02

Komponen	Massa Dry Basis (kg)	%
Cl	6,766	67,66
H	1,060	10,60
O	1,727	17,27
N	0,023	0,23
S	0,007	0,07
Cl	0,015	0,15

Element	%w/w	Lb/hr	Aw (Atomic Weight)	Lb-Atom	%Atom
C	67,66	14,91658392	12,01	1,24	32,65
H	10,60	2,337124503	1,01	2,32	60,96
Cl	0,15	0,033316797	35,45	0,0009	0,02
S	0,07	0,014398331	32,06	0,0004	0,01
O	17,27	3,806726559	16,00	0,24	6,26
N	0,23	0,051023968	14,00	0,00	0,10
Total		21,15917408		3,80	100,00

## Variasi 5

Komposisi Sampah	Jumlah Sampah (%)	Berat Sampah (kg)	Berat air (kg)	Berat Kering (kg)	Komposisi Dry Basis (kg)					
					C	H	O	N	S	Cl
PP	70,00%	7	0,0112	6,9888	5,94	0,97	0,0671	0,0056	0,0007	0,00
kain	15,00%	1,5	0,1500	1,3500	0,64	0,09	0,6094	0,0111	0,0018	0,01
kayu	15,00%	1,5	0,3000	1,2000	0,58	0,08	0,5364	0,0005	0,0035	0,00
kertas dan kardus	0,00%	0	0,0000	0,0000	0,00	0,00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
Total		10,00	0,46	9,54	7,16	1,14	1,21	0,02	0,01	0,01

Komponen	Massa Dry Basis (kg)	%
Cl	7,164	71,64
H	1,138	11,38
O	1,213	12,13
N	0,017	0,17
S	0,006	0,06
Cl	0,009	0,09

Element	%w/w	Lb/hr	Aw (Atomic Weight)	Lb-Atom	%Atom
C	71,64	15,79376048	12,01	1,32	33,08
H	11,38	2,508900585	1,01	2,49	62,62
Cl	0,09	0,019345365	35,45	0,0005	0,01
S	0,06	0,013081832	32,06	0,0004	0,01
O	12,13	2,673920715	16,00	0,17	4,20
N	0,17	0,037789137	14,00	0,00	0,07
Total		21,04679812		3,97	100,00

## Variasi 6

Komposisi Sampah	Jumlah Sampah (%)	Berat Sampah (kg)	Berat air (kg)	Berat Kering (kg)	Komposisi Dry Basis (kg)					
					C	H	O	N	S	Cl
PP	70,00%	7	0,0112	6,9888	5,94	0,97	0,0671	0,0056	0,0007	0,00
kain	15,00%	1,5	0,1500	1,3500	0,64	0,09	0,6094	0,0111	0,0018	0,01
kayu	0,00%	0	0,0000	0,0000	0,00	0,00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
kertas dan kardus	15,00%	1,5	0,1530	1,3470	0,61	0,08	0,6425	0,0027	0,0027	0,00
Total		10,00	0,31	9,69	7,20	1,14	1,32	0,02	0,01	0,01

Komponen	Massa Dry Basis (kg)	%
C	7,197	71,97
H	1,143	11,43
O	1,319	13,19
N	0,019	0,19
S	0,005	0,05
Cl	0,011	0,11

Element	%w/w	Lb/hr	Aw (Atomic Weight)	Lb-Atom	%Atom
C	71,97	15,86581784	12,01	1,32	32,97
H	11,43	2,519366924	1,01	2,50	62,39
Cl	0,11	0,024987598	35,45	0,0007	0,02
S	0,05	0,011349016	32,06	0,0004	0,01
O	13,19	2,907870663	16,00	0,18	4,54
N	0,19	0,042670121	14,00	0,00	0,08
Total		21,37206216		4,01	100,00

## Variasi 7

Komposisi Sampah	Jumlah Sampah (%)	Berat Sampah (kg)	Berat air (kg)	Berat Kering (kg)	Komposisi Dry Basis (kg)					
					C	H	O	N	S	Cl
PP	80,00%	8	0,0128	7,9872	6,79	1,11	0,0767	0,0064	0,0008	0,00
kain	10,00%	1	0,1000	0,9000	0,43	0,06	0,4063	0,0074	0,0012	0,01
kayu	10,00%	1	0,2000	0,8000	0,39	0,05	0,3576	0,0003	0,0023	0,00
kertas dan kardus	0,00%	0	0,0000	0,0000	0,00	0,00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
Total		10,00	0,31	9,69	7,61	1,22	0,84	0,01	0,00	0,01

Komponen	Massa Dry Basis (kg)	%
Cl	7,605	76,05
H	1,222	12,22
O	0,841	8,41
N	0,014	0,14
S	0,004	0,04
Cl	0,006	0,06

Element	%w/w	Lb/hr	Aw (Atomic Weight)	Lb-Atom	%Atom
C	76,05	16,76701352	12,01	1,40	33,34
H	12,22	2,694631786	1,01	2,67	63,83
Cl	0,06	0,01289691	35,45	0,0004	0,01
S	0,04	0,009454912	32,06	0,0003	0,01
O	8,41	1,853048135	16,00	0,12	2,77
N	0,14	0,031062285	14,00	0,002	0,05
Total		21,36810755		4,19	100,00

## Variasi 8

Komposisi Sampah	Jumlah Sampah (%)	Berat Sampah (kg)	Berat air (kg)	Berat Kering (kg)	Komposisi Dry Basis (kg)					
					C	H	O	N	S	Cl
PP	80,00%	8	0,0128	7,9872	6,79	1,11	0,0767	0,0064	0,0008	0,00
kain	10,00%	1	0,1000	0,9000	0,43	0,06	0,4063	0,0074	0,0012	0,01
kayu	0,00%	0	0,0000	0,0000	0,00	0,00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
kertas dan kardus	10,00%	1	0,1020	0,8980	0,41	0,06	0,4283	0,0018	0,0018	0,00
Total		10,00	0,21	9,79	7,63	1,23	0,91	0,02	0,00	0,01

Komponen	Massa Dry Basis (kg)	%
Cl	7,627	76,27
H	1,225	12,25
O	0,911	9,11
N	0,016	0,16
S	0,004	0,04
Cl	0,008	0,08

Element	%w/w	Lb/hr	Aw (Atomic Weight)	Lb-Atom	%Atom
C	76,27	16,81505175	12,01	1,40	33,26
H	12,25	2,701609345	1,01	2,68	63,68
Cl	0,08	0,016658399	35,45	0,0005	0,01
S	0,04	0,008299702	32,06	0,0003	0,01
O	9,11	2,009014766	16,00	0,13	2,98
N	0,16	0,034316274	14,00	0,00	0,06
Total		21,58495024		4,21	100,00



## II. Perhitungan Destruction Removal Efficiency tiap variasi

### Variasi 1

Jenis	Berat Sampah (kg)	Berat Abu (kg)
PP	5	0,2225
Kain	2,5	0,1625
Kayu	2,5	0,015
Kertas dan Kardus	0	0
Total	10	0,40

Sehingga DRE variasi 1 adalah:

$$\begin{aligned} \text{DRE variasi 1 (\%)} &= \frac{10 \text{ kg} - 0,4 \text{ kg}}{10 \text{ kg}} \times 100\% \\ &= 96\% \end{aligned}$$

### Variasi 2

Jenis	Berat Sampah (kg)	Berat Abu (kg)
PP	5	0,2225
Kain	2,5	0,1625
Kayu	0	0
Kertas dan Kardus	2,5	0,125
Total	10	0,51

Sehingga DRE variasi 2 adalah:

$$\begin{aligned} \text{DRE variasi 2 (\%)} &= \frac{10 \text{ kg} - 0,51 \text{ kg}}{10 \text{ kg}} \times 100\% \\ &= 94,9\% \end{aligned}$$

### Variasi 3

Jenis	Berat Sampah (kg)	Berat Abu (kg)
PP	6	0,267
Kain	2	0,13
Kayu	2	0,012
Kertas dan Kardus	0	0
Total	10	0,409

Sehingga DRE variasi 3 adalah:

$$\begin{aligned} \text{DRE variasi 3 (\%)} &= \frac{10 \text{ kg} - 0,409 \text{ kg}}{10 \text{ kg}} \times 100\% \\ &= 95,91\% \end{aligned}$$

### Variasi 4

Jenis	Berat Sampah (kg)	Berat Abu (kg)
PP	6	0,267
Kain	2	0,13
Kayu	0	0
Kertas dan Kardus	2	0,1
Total	10	0,497

Sehingga DRE variasi 4 adalah:

$$\begin{aligned} \text{DRE variasi 4 (\%)} &= \frac{10 \text{ kg} - 0,497 \text{ kg}}{10 \text{ kg}} \times 100\% \\ &= 95,03\% \end{aligned}$$

### Variasi 5

Jenis	Berat Sampah (kg)	Berat Abu (kg)
PP	7	0,3115
Kain	1,5	0,0975
Kayu	1,5	0,009
Kertas dan Kardus	0	0
Total	10	0,418

Sehingga DRE variasi 5 adalah:

$$\begin{aligned} \text{DRE variasi 5 (\%)} &= \frac{10 \text{ kg} - 0,418 \text{ kg}}{10 \text{ kg}} \times 100\% \\ &= 95,82\% \end{aligned}$$

### Variasi 6

Jenis	Berat Sampah (kg)	Berat Abu (kg)
PP	7	0,3115
Kain	1,5	0,0975
Kayu	0	0
Kertas dan Kardus	1,5	0,075
Total	10	0,484

Sehingga DRE variasi 6 adalah:

$$\begin{aligned} \text{DRE variasi 6 (\%)} &= \frac{10 \text{ kg} - 0,484 \text{ kg}}{10 \text{ kg}} \times 100\% \\ &= 95,16\% \end{aligned}$$

### Variasi 7

Jenis	Berat Sampah (kg)	Berat Abu (kg)
PP	8	0,356
Kain	1	0,065
Kayu	1	0,006
Kertas dan Kardus	0	0
Total	10	0,427

Sehingga DRE variasi 7 adalah:

$$\begin{aligned} \text{DRE variasi 7 (\%)} &= \frac{10 \text{ kg} - 0,427 \text{ kg}}{10 \text{ kg}} \times 100\% \\ &= 95,73\% \end{aligned}$$

### Variasi 8

Jenis	Berat Sampah (kg)	Berat Abu (kg)
PP	8	0,356
Kain	1	0,065
Kayu	0	0
Kertas dan Kardus	1	0,05
Total	10	0,471

Sehingga DRE variasi 8 adalah:

$$\begin{aligned} \text{DRE variasi 8 (\%)} &= \frac{10 \text{ kg} - 0,471 \text{ kg}}{10 \text{ kg}} \times 100\% \\ &= 95,29\% \end{aligned}$$

### III. Perhitungan Reaksi Stoikiometrik tiap variasi

#### Variasi 1

Simbol	Konstanta	Elemen
z	0,115	C
y	0,212	H
w	0,00009	Cl
v	0,00006	S
x	0,027	O
u	0,000	N
r	0,000	F
s	0,000	Br
t	0,000	I
w+r	0,000	
Ø	0,053	

#### Variasi 2

Simbol	Konstanta	Elemen
z	0,116	C
y	0,214	H
w	0,00012	Cl
v	0,00005	S
x	0,029	O
u	0,000	N
r	0,000	F
s	0,000	Br
t	0,000	I
w+r	0,000	
Ø	0,053	

### Variasi 3

Simbol	Konstanta	Elemen
z	0,123	C
y	0,230	H
w	0,00007	Cl
v	0,00005	S
x	0,022	O
u	0,000	N
r	0,000	F
s	0,000	Br
t	0,000	I
w+r	0,000	
∅	0,058	

### Variasi 4

Simbol	Konstanta	Elemen
z	0,124	C
y	0,232	H
w	0,00009	Cl
v	0,00004	S
x	0,024	O
u	0,000	N
r	0,000	F
s	0,000	Br
t	0,000	I
w+r	0,000	
∅	0,058	

### Variasi 5

Simbol	Konstanta	Elemen
z	0,132	C
y	0,249	H
w	0,00005	Cl
v	0,00004	S
x	0,017	O
u	0,000	N
r	0,000	F
s	0,000	Br
t	0,000	I
w+r	0,000	
∅	0,062	

### Variasi 6

Simbol	Konstanta	Elemen
z	0,132	C
y	0,250	H
w	0,00007	Cl
v	0,00004	S
x	0,018	O
u	0,000	N
r	0,000	F
s	0,000	Br
t	0,000	I
w+r	0,000	
∅	0,062	

### Variasi 7

Simbol	Konstanta	Elemen
z	0,140	C
y	0,267	H
w	0,00004	Cl
v	0,00003	S
x	0,012	O
u	0,0002	N
r	0,000	F
s	0,000	Br
t	0,000	I
w+r	0,00004	
Ø	0,067	

### Variasi 8

Simbol	Konstanta	Elemen
z	0,140	C
y	0,268	H
w	0,00005	Cl
v	0,00003	S
x	0,013	O
u	0,000	N
r	0,000	F
s	0,000	Br
t	0,000	I
w+r	0,000	
Ø	0,067	



#### IV. Perhitungan Temperatur dari variasi PP dan Kadar Air Sampah

##### Variasi 1

T (°K)	1378,553
T (°F)	2021,725
T (°C)	1105,553
T (°R)	2481,395
T0 (°K)	298
NHV(Cal/g)	6.692,37-
ΔHFG	6.692,37
NHV+ΔHFG	(0,00)

##### Variasi 2

T (°K)	1376,832
T (°F)	2018,628
T (°C)	1103,832
T (°R)	2478,298
T0 (°K)	298
NHV(Cal/g)	6.698,73-
ΔHFG	6.698,74
NHV+ΔHFG	0,00

### Variasi 3

T ( <sup>0</sup> K)	1383,627
T ( <sup>0</sup> F)	2030,859
T ( <sup>0</sup> C)	1110,627
T ( <sup>0</sup> R)	2490,529
T0 ( <sup>0</sup> K)	298
NHV(Cal/g)	7.361,75-
ΔHFG	7.361,75
NHV+ΔHFG	0,00

### Variasi 4

T ( <sup>0</sup> K)	1382,358
T ( <sup>0</sup> F)	2028,574
T ( <sup>0</sup> C)	1109,358
T ( <sup>0</sup> R)	2488,244
T0 ( <sup>0</sup> K)	298
NHV(Cal/g)	7.366,84-
ΔHFG	7.366,84
NHV+ΔHFG	0,00

### Variasi 5

T ( <sup>0</sup> K)	1387,893
T ( <sup>0</sup> F)	2038,537
T ( <sup>0</sup> C)	1114,893
T ( <sup>0</sup> R)	2498,207
T0 ( <sup>0</sup> K)	298
NHV(Cal/g)	8.031,12-
ΔHFG	8.031,13
NHV+ΔHFG	0,00

### Variasi 6

T ( <sup>0</sup> K)	1387,011
T ( <sup>0</sup> F)	2036,950
T ( <sup>0</sup> C)	1114,011
T ( <sup>0</sup> R)	2496,620
T0 ( <sup>0</sup> K)	298
NHV(Cal/g)	8.034,94-
ΔHFG	8.034,95
NHV+ΔHFG	0,00

### Variasi 7

T ( <sup>0</sup> K)	1391,530
T ( <sup>0</sup> F)	2045,084
T ( <sup>0</sup> C)	1118,530
T ( <sup>0</sup> R)	2504,754
T0 ( <sup>0</sup> K)	298
NHV(Cal/g)	8.700,50-
ΔHFG	8.700,51
NHV+ΔHFG	0,00

### Variasi 8

T ( <sup>0</sup> K)	1390,982
T ( <sup>0</sup> F)	2044,098
T ( <sup>0</sup> C)	1122,982
T ( <sup>0</sup> R)	2503,768
T0 ( <sup>0</sup> K)	298
NHV(Cal/g)	8.703,05-
ΔHFG	8.703,05
NHV+ΔHFG	0,00

**V. Perhitungan Emisi Gas Buang dari Variasi PP dan Kadar Air Sampah**

Variasi 1

Laju alir massa (Lb/hr)	100,053
laju alir molar (Lbmol/hr)	3,399
R	0,730
laju alir volumetrik (ft <sup>3</sup> /hr)	6158,901
laju alir volumetrik (acfm)	102,648
Konsentrasi SO <sub>3</sub> (ppm)	27,8949870
Konsentrasi Cl <sub>2</sub> (ppm)	63,137

Variasi 2

Laju alir massa (Lb/hr)	100,295
laju alir molar (Lbmol/hr)	3,407
R	0,730
laju alir volumetrik (ft <sup>3</sup> /hr)	6165,652
laju alir volumetrik (acfm)	102,761
Konsentrasi SO <sub>3</sub> (ppm)	29,131
Konsentrasi Cl <sub>2</sub> (ppm)	65,934

Variasi 3

Laju alir massa (Lb/hr)	109,541
laju alir molar (Lbmol/hr)	3,724
R	0,730
laju alir volumetrik (ft <sup>3</sup> /hr)	6772,511
laju alir volumetrik (acfm)	112,875
Konsentrasi SO <sub>3</sub> (ppm)	28,601
Konsentrasi Cl <sub>2</sub> (ppm)	64,736

#### Variasi 4

Laju alir massa (Lb/hr)	109,734
laju alir molar (Lbmol/hr)	3,730
R	0,730
laju alir volumetrik (ft <sup>3</sup> /hr)	6777,898
laju alir volumetrik (acfm)	112,965
Konsentrasi SO <sub>3</sub> (ppm)	30,367
Konsentrasi Cl <sub>2</sub> (ppm)	68,732

#### Variasi 5

Laju alir massa (Lb/hr)	119,029
laju alir molar (Lbmol/hr)	4,049
R	0,730
laju alir volumetrik (ft <sup>3</sup> /hr)	7386,155
laju alir volumetrik (acfm)	123,103
Konsentrasi SO <sub>3</sub> (ppm)	29,641
Konsentrasi Cl <sub>2</sub> (ppm)	67,089

#### Variasi 6

Laju alir massa (Lb/hr)	119,174
laju alir molar (Lbmol/hr)	4,054
R	0,730
laju alir volumetrik (ft <sup>3</sup> /hr)	7390,189
laju alir volumetrik (acfm)	123,170
Konsentrasi SO <sub>3</sub> (ppm)	31,367
Konsentrasi Cl <sub>2</sub> (ppm)	70,996

### Variasi 7

Laju alir massa (Lb/hr)	128,516
laju alir molar (Lbmol/hr)	4,374
R	0,730
laju alir volumetrik (ft <sup>3</sup> /hr)	7999,827
laju alir volumetrik (acfm)	133,330
Konsentrasi SO <sub>3</sub> (ppm)	31,465
Konsentrasi Cl <sub>2</sub> (ppm)	71,218

### Variasi 8

Laju alir massa (Lb/hr)	128,613
laju alir molar (Lbmol/hr)	4,377
R	0,730
laju alir volumetrik (ft <sup>3</sup> /hr)	8002,511
laju alir volumetrik (acfm)	133,375
Konsentrasi SO <sub>3</sub> (ppm)	32,564
Konsentrasi Cl <sub>2</sub> (ppm)	73,704

## **VI. Perhitungan Emisi Pembakaran Hanya Sampah PP**

Menurut John dkk (2011) Jika diasumsikan:

- Temperatur input sampah, bahan bakar, dan udara adalah 15,5 °C
- Udara terdiri dari 23% O<sub>2</sub> dan 77% N<sub>2</sub> (dalam berat)
- Udara mengandung 0,0132 kg H<sub>2</sub>O/kg *dry air* pada 60% kelembapan relatif dan 26,7 °C *dry bulb temperature*
- Untuk gas ideal: 1 kg mol sama dengan 22,4 m<sup>3</sup> pada 0°C dan 101,3 kpa
- Panas laten dari penguapan air pada 15,5 °C adalah 2460,3 kJ/kg

Perhitungan input material pada 50% PP:

- Komponen: C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>
- HHV : 44100 kJ/kg

- Input : 5 kg/jam
- Total panas = 44100 kJ/kg x 10 kg/kg = 441000 kJ/jam

Perhitungan oksigen secara stoikiometrik:



Massa relatif	84	144	264	108
	1	1,71	3,14	1,28
Input (kg)	5	8,57	15,71	6,4

Perhitungan jumlah udara untuk pembakaran sampah:

- Jumlah oksigen stoikiometrik = 8,57 kg
- Udara stoikiometri = 8,57 x 100/23 = 37,26 kg/jam udara
- Udara yang dibutuhkan pada 100% excess air = (1x37,26)+37,26 = 74,53 kg/jam

### *Material Balance*

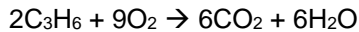
- Total massa sampah = 5 kg/jam
  - Dry air = 74, 53 kg/jam
  - Kelembaban pada udara = 0,0132x74,53 = 0,9838 kg/jam
  - Total massa input = 80,51 kg/jam
  - Total massa output
- a. Produk Kering dari sampah
- Suplai udara untuk sampah = 74,53 kg/jam
  - Udara stoikiometri = 37,26 kg/jam
  - Total *excess air* = 37,26 kg/jam
  - Nitrogen dari udara stoikiometri = 77% x 37,26 = 28,69 kg/jam
- CO<sub>2</sub> dari pembakaran = 15,714 kg/jam

- Total dry product = 81,67 kg/jam
- b. Kelembaban
  - H<sub>2</sub>O sampah = 0,16% x 5kg  
= 0,008 kg/jam
  - H<sub>2</sub>O reaksi pembakaran = 6,42 kg/jam
  - H<sub>2</sub>O pada udara pembakaran = 0,983 kg/jam
  - Total kelembaban = 7,42 kg/jam
- c. Abu = 4% x 5 kg  
= 0,2 kg

Perhitungan input material pada 60% PP:

- Komponen: C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>
- HHV : 44100 kJ/kg
- Input : 6 kg/jam
- Total panas = 44100 kJ/kg x 6 kg/kg = 264600 kJ/jam

Perhitungan oksigen secara stoikiometrik:



Massa relatif	84	144	264	108
	1	1,71	3,14	1,28
Input (kg)	6	10,28	18,85	7,71

Perhitungan jumlah udara untuk pembakaran sampah:

- Jumlah oksigen stoikiometrik = 10,285 kg
- Udara stoikiometri = 10,285 x 100/23  
= 44,72 kg/jam udara
- Udara yang dibutuhkan pada 100% excess air  
= (1x44,72)+ 44,72  
=89,44 kg/jam

*Material Balance*

- Total massa sampah = 6 kg/jam



- Dry air = 89,44 kg/jam
- Kelembaban pada udara =  $0,0132 \times 89,44$   
= 1,18 kg/jam
- Total massa input = 96,62 kg/jam
- Total massa output
  
- a. Produk Kering dari sampah
  - Suplai udara untuk sampah = 89,44 kg/jam
  - Udara stoikiometri = 44,72 kg/jam
  - Total *excess air* = 44,72 kg/jam
  - Nitrogen dari udara stoikiometri =  $77\% \times 44,72$   
= 34,43 kg/jam
  
  - CO<sub>2</sub> dari pembakaran = 18,85 kg/jam
  - Total *dry product* = 98,012 kg/jam
  
- b. Kelembaban
  - H<sub>2</sub>O sampah =  $0,16\% \times 6\text{kg}$   
= 0,0096 kg/jam
  - H<sub>2</sub>O reaksi pembakaran = 7,71 kg/jam
  - H<sub>2</sub>O pada udara pembakaran = 1,18 kg/jam
  - Total kelembaban = 8,9 kg/jam
  
- c. Abu =  $4\% \times 6\text{ kg}$   
= 0,24 kg

Perhitungan input material pada 70% PP:

- Komponen: C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>
- HHV : 44100 kJ/kg
- Input : 7 kg/jam
- Total panas =  $44100\text{ kJ/kg} \times 7\text{ kg/kg} = 308700\text{ kJ/jam}$

Perhitungan oksigen secara stoikiometrik:



Massa relatif	84	144	264	108
	1	1,71	3,14	1,28

Input (kg)	7	12	22	9
---------------	---	----	----	---

Perhitungan jumlah udara untuk pembakaran sampah:

- Jumlah oksigen stoikiometrik = 12 kg
- Udara stoikiometri =  $12 \times 100/23$   
= 52,17 kg/jam udara
- Udara yang dibutuhkan pada 100% excess air  
=  $(1 \times 52,17) + 52,17$   
= 104,34 kg/jam

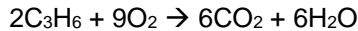
#### Material Balance

- Total massa sampah = 7 kg/jam
- Dry air = 104,34 kg/jam
- Kelembaban pada udara =  $0,0132 \times 104,34$   
= 1,377 kg/jam
- Total massa input = 112,72 kg/jam
  
- a. Produk Kering dari sampah
  - Suplai udara untuk sampah = 104,34 kg/jam
  - Udara stoikiometri = 52,17 kg/jam
  - Total excess air = 52,17 kg/jam
  - Nitrogen dari udara stoikiometri =  $77\% \times 52,17$   
= 40,17 kg/jam
  
  - CO<sub>2</sub> dari pembakaran = 22 kg/jam
  - Total dry product sampah = 114,34 kg/jam
  
- b. Kelembaban
  - H<sub>2</sub>O sampah =  $0,16\% \times 7\text{kg}$   
= 0,0112 kg/jam
  - H<sub>2</sub>O reaksi pembakaran = 9 kg/jam
  - H<sub>2</sub>O pada udara pembakaran = 1,37 kg/jam
  - Total kelembaban = 10,38 kg/jam
  
- c. Abu =  $4\% \times 7\text{ kg}$   
= 0,28 kg

Perhitungan input material pada 80% PP:

- Komponen: C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>
- HHV : 44100 kJ/kg
- Input : 8 kg/jam
- Total panas = 44100 kJ/kg x 8 kg/kg = 352800 kJ/jam

Perhitungan oksigen secara stoikiometrik:



Massa relatif	84	144	264	108
	1	1,71	3,14	1,28
Input (kg)	8	13,71	25,14	10,28

Perhitungan jumlah udara untuk pembakaran sampah:

- Jumlah oksigen stoikiometrik = 13,71 kg
- Udara stoikiometri = 13,71 x 100/23 = 59,62 kg/jam udara
- Udara yang dibutuhkan pada 100% excess air = (1x59,62)+ 59,62 = 119,25 kg/jam

*Material Balance*

- Total massa sampah = 8 kg/jam
  - Dry air = 119,25 kg/jam
  - Kelembaban pada udara = 0,0132x119,25 = 1,574 kg/jam
  - Total massa input = 128,82 kg/jam
- a. Produk Kering dari sampah
- Suplai udara untuk sampah = 119,25 kg/jam
  - Udara stoikiometri = 59,62 kg/jam
  - Total excess air = 59,62 kg/jam
  - Nitrogen dari udara stoikiometri = 77% x 59,62 = 45,91 kg/jam

- CO<sub>2</sub> dari pembakaran = 22 kg/jam
- Total *dry product* sampah = 140,43 kg/jam
  
- b. Kelembaban
  - H<sub>2</sub>O sampah = 0,16% x 8kg  
= 0,0128 kg/jam
  - H<sub>2</sub>O reaksi pembakaran = 10,28 kg/jam
  - H<sub>2</sub>O pada udara pembakaran = 1,574 kg/jam
  - Total kelembaban = 11,87 kg/jam
  
- c. Abu = 4% x 8 kg  
= 0,32 kg

Sehingga didapatkan tabel sebagai berikut:

Total Moisture (kg/hr)	Jumlah PP (%)	CO <sub>2</sub> (kg/jam)	N <sub>2</sub> (kg/jam)
7,42042236	50	15,71428571	28,6956522
8,904506832	60	18,85714286	34,4347826
10,3885913	70	22	40,173913
11,87267578	80	25,14285714	45,9130435

## BIOGRAFI PENULIS



Penulis lahir di Tuban, Jawa Timur pada tanggal 23 Juni 1998. Sehari-hari akrab disapa dengan panggilan Sasa. Penulis merupakan putri kedua dari tiga bersaudara dari pasangan Bapak Ir. Rudi Hartono, MM. dan ibu Endang Sri Redjeki. Penulis mengenyam pendidikan dasar pada tahun 2004-2010 di SD Muhammadiyah GKB Gresik. Kemudian dilanjutkan di SMP

Muhammadiyah 12 GKB Gresik pada tahun 2010-2013. Dilanjutkan ke SMA Negeri 1 Gresik pada tahun 2013-2016. Pada Tahun 2016 melanjutkan pendidikan S1 di Departemen Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil Lingkungan dan Kebumihan, ITS, Surabaya. Penulis memiliki ketertarikan terhadap seni musik, desain grafis, dan ilustrasi.

Selama Perkuliahan, penulis aktif di Unit Kegiatan Mahasiswa (UKM) Paduan Suara Mahasiswa ITS sebagai sekretaris Departemen Pengembangan Sumber Daya Musik dan telah menjuarai beberapa kompetisi baik nasional maupun internasional, sebagai staff di Environmental Engineering English Club HMTL ITS, serta sebagai asisten laboratorium Remediasi Badan Air Pesisir dan laboratorium Teknik Analisis Pencemaran Lingkungan. Peneliti dapat dihubungi via email yaitu [annisa.rudend@gmail.com](mailto:annisa.rudend@gmail.com) atau via Instagram @sasa.rudend



# BERITA ACARA DAN SARAN PERBAIKAN

Lisan Udara

---

## Lab Pengendalian Pencemaran Udara dan Perubahan Iklim

Input NRP anda (tanpa spasi,format: 32xxxxxxxxxxx) \*

321164000002

### Annisa Jasmine Rudend (321164000002)

Dosen Pembimbing: Prof. Ir. Joni Hermana, MScES, PhD

Saran:

Perbaiki sesuai saran Penguji (Format, Metodologi untuk perhitungan emisi bukan hanya dari proximate karena PP sudah diketahui, Abstrak, Kesimpulan dan Saran harus kuantitatif)

LULUS

Dosen Penguji 1: Dr. Abdu Fadli Assomadi, S.Si, MT

Saran:

1. Abstrak dinyatakan dengan kuantitatif... perubahan seberapa besar? Dan satuan spesifiknya bagaimana?
2. Margin di daftar isi, daftar gambar, daftar tabel dirapikan
3. Kesimpulan 1 dan 2 dinyatakan kuantitatif, besar perubahan dan satuan spesifiknya
4. Notasi kimia ditulis yang benar sesuai kaidah ilmiah... pada teks, terutama pada gambar daftar, dan daftar pustaka
5. Saran: perhitungan teoritis lebih akurat
6. Reaksi kimia pembakaran dan emisi yang dihasilkan... hubungkan dengan variasi kondisi pembakaran dan komposisi emisi yang dihasilkan... jelaskan

LULUS

Dosen Penguji 2: Dr. Eng. Arie Dipareza Syafe'i, ST., MEPM

Saran:

1. Karena anda melakukan studi tentang insinerator, tolong dijelaskan apa kelemahan dari insinerator dalam penyisihan emisi?
2. Apakah insinerator menggunakan bahan bakar?  
Kira2 apakah bisa insinerator berjalan jika injeksi bahan bakarnya di awal saja?
3. Faktor apakah yang bisa menyebabkan pembakaran?
4. Oksigen diperlukan dalam proses pembakaran. Campuran oksigen dengan bahan bakar bisa masuk kategori "rich" atau "lean". Tolong dijelaskan bedanya dan bagaimana dengan penelitian ini?
5. Hal 46 Dalam perhitungan DRE variasi 7, darimana angka 0,427kg? DRE dimasukkan ke dalam Bab 3, persamaannya merfer ke Bab 2
6. Hal 36 Penulisan Sumber di tabel 4.4 harus diperbaiki. Penulisannya "zhou, 2014", seharusnya "Zhou, 2014". Itupun tidak ada di daftar pustaka

LULUS

Dosen Penguji 3: Alfian Purnomo, ST, MT

Saran:

Lihat lebih lanjut (<https://drive.google.com/open?id=1Tm1teVjyINssoXrCdUwD7Yy2N3Lvj0E>)

LULUS

**BERITA ACARA**  
**SIDANG TUGAS AKHIR**

Hari / Tanggal : Senin, 13 Juli 2020

Mahasiswa : ANNISA JASMINE RUDEND

NRP : 0321164000002

Daftar Perbaikan dan Saran

1. Penulisan di daftar isi, daftar gambar, dan daftar tabel diperbaiki, contoh bagian yang diperbaiki:

<b>AB 2 STUDI LITERATUR</b> .....	5	Gambar 4. 1	Desain Insinerator .....	32
2.1 Plastik .....	5	Gambar 4. 2	Grafik Pengaruh Variasi jumlah PP dan kadar air sampah terhadap .....	48
2.1.1 Jenis dan Karakter .....	5	Gambar 4. 3	Gri .....	50
2.2 Plastik <i>Polypropylene</i> .....	8	Gambar 4. 4	Grafik Pengaruh Jumlah PP terhadap Emisi Gas Buang Insinerator .....	52
2.2.1 Sifat Fisik dan Kimia Polypropylene (PP) .....	9			
2.2.2 Plastik Sebagai Sumber Energi .....	9			

2. Terdapat bagian yang belum sesuai dengan metode pelaksanaan penelitian setelah ada perubahan
3. Pembahasan perlu ditambahkan pengaruh bahan selain PP terhadap parameter yang diukur

Dosen Pengarah,

Alfan Purnomo, ST, MT