



TUGAS AKHIR - RE 184804

**KAJIAN PEMBAKARAN SAMPAH PLASTIK
POLYSTYRENE (PS) TERHADAP EMISI, SUHU
PEMBAKARAN, DAN DESTRUCTION
REMOVAL EFFICIENCY PADA INSINERATOR**

ASRI ANISA YULIAWATI
NRP. 0321164000039

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 ini sengaja dikosongkan”



TUGAS AKHIR - RE 184804

**KAJIAN PEMBAKARAN SAMPAH PLASTIK
POLYSTYRENE (PS) TERHADAP EMISI,
SUHU PEMBAKARAN, DAN DESTRUCTION
REMOVAL EFFICIENCY PADA INSINERATOR**

ASRI ANISA YULIAWATI
NRP. 0321164000039

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 ini sengaja dikosongkan”



FINAL PROJECT - RE 184804

STUDY OF *POLYSTYRENE* (PS) PLASTIC WASTE
COMBUSTION ON EMISSION, TEMPERATURE,
AND DESTRUCTION REMOVAL EFFICIENCY
(DRE) OF INCINERATOR

ASRI ANISA YULIAWATI
NRP. 0321164000039

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

DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL
Faculty of Civil Planning and Geo Engineering
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2020

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

HALAMAN PENGESAHAN

HALAMAN PENGESAHAN

KAJIAN PEMBAKARAN SAMPAH PLASTIK *POLYSTYRENE* (PS) TERHADAP EMISI, SUHU PEMBAKARAN, DAN DESTRUCTION REMOVAL EFFICIENCY (DRE) PADA 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 :

ASRI ANISA YULIAWATI

NRP. 03211640000039

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir



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

NIP. (19600618 198803 1 002)



ABSTRAK

**Kajian Pembakaran Sampah Plastik *Polystyrene* (PS)
terhadap Emisi, Suhu Pembakaran, dan *Destruction Removal
Efficiency* (DRE) pada Insinerator**

Nama : Asri Anisa Yuliatwati
NRP : 03211640000039
Departemen : Teknik Lingkungan, FTSPK, ITS
Dosen Pembimbing : Prof. Ir. Joni Hermana, M.Sc.Es., Ph.D.

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh faktor operasi insinerator. Faktor operasi yang dipilih yaitu *feeding rate* dan *excess air*. Kedua faktor ini menjadi control terhadap *temperature*, *time*, dan *turbulence* (3T) dalam pengoperasian insinerator. *Feeding rate* dan *excess air* dijadikan variabel dalam penelitian ini. *Feeding rate* dan *excess air* diteliti pengaruhnya terhadap emisi, suhu pembakaran dan *Destruction Removal Efficiency* (DRE). Selain itu juga bertujuan untuk menentukan nilai *feeding rate* dan *excess air* yang mamou menghasilkan emisi paling rendah dan suhu pembakaran paling tinggi. Variabel *feeding rate* divariasikan dari 2 kg/jam – 31 kg/jam. Sedangkan untuk variabel penambahan *excess air* dimulai dari 5%, 15%, dan 25%. Selain itu juga memperhitungkan desain dari Insinerator Departemen Teknik Lingkungan ITS.

Penelitian dilakukan dengan simulasi persamaan matematis. Nilai DRE dihitung dengan rumus DRE yang berdasar pada jumlah sampah yang terdestruksi menjadi abu. Dimana produksi abu dihitung dengan menggunakan fraksi kandungan abu. Untuk parameter emisi dan suhu pembakaran menggunakan dan rumus desain insinerator. Rumus desain insinerator ini didasari oleh kesetimbangan persamaan reaksi pembakaran yang terjadi. Sampah yang dibakar yaitu sampah dengan komposisi homogen. Hanya terdiri dari sampah plastik *polystyrene* dengan rumus senyawa $(C_8H_8)_x$. Proses pembakaran yang terjadi diasumsikan sempurna, menghasilkan CO_2 dan H_2O .

Dari hasil simulasi pembakaran pada insinerator secara teoritis pada penelitian ini, diketahui bahwa semakin tinggi *feeding rate* maka semakin tinggi pula emisi dan suhu pembakaran yang

dihasilkan. Untuk hasil analisis pada variabel *excess air*, semakin besar persentase *excess air* yang ditambahkan, suhu pembakaran yang dicapai semakin rendah. Dari hasil penelitian juga didapatkan bahwa emisi CO₂ dan N₂ paling rendah dihasilkan pada feeding rate 2 kg/jam pada semua variasi *excess air* yaitu sebesar 6,764 kgCO₂/jam dan 20,585 kgN₂/jam. Sedangkan suhu pembakaran paling tinggi dihasilkan pada feeding rate 31 kg/jam dengan variasi *excess air* 5% yaitu sebesar 1185,271 celsius. Serta untuk nilai DRE diperoleh sama untuk semua variasi *feeding rate* sebesar 99,96%.

Kata kunci: insinerasi plastik *polystyrene*, DRE, feeding rate, excess air, emisi

ABSTRACT

Study of Polystyrene (PS) Plastic Waste Combustion on Emission, Temperature, and Destruction Removal Efficiency (DRE) of Incinerator

Name : Asri Anisa Yuliawati
NRP : 03211640000039
Study Program : Environmental Engineering
Supervisor : Prof. Ir. Joni Hermana, M.Sc.Es., Ph.D.

ABSTRACT

This study aims to determine the effect of feeding rate and excess air on emissions, combustion temperatures, and Destruction Removal Efficiency (DRE). In incineration operation, these two factors control the temperature, time, and turbulence (3T). This study also aims to determine the value of feeding rate and excess air which can produce the lowest emissions and the highest combustion temperature. The value feeding rate used in this study is varied from 2 kg/hour - 31 kg/hour. Whereas the variation of the addition of excess air in this study is 5%, 15%, and 25%. It also takes into account the design of the ITS Environmental Engineering Department Incinerator.

The study was conducted using mathematical equations simulation. The DRE value is calculated using a formula based on the amount of waste that is reduced to ash. As for ash production, it is calculated using the ash content fraction. Emissions and combustion temperatures are estimated using the incinerator design formula. This incinerator design formula is based on the equilibrium of the combustion reaction that occurs. Homogeneous waste is used in this study. Where it only consists of polystyrene plastic waste with the empirical formula of $(C_8H_8)_x$. The combustion process that occurs is assumed to be complete, producing CO_2 and H_2O .

From the theoretical results of the combustion simulation in this study, it is known that the feeding rate has a proportional relationship with the emissions and the resulting combustion temperature. The higher the feeding rate, the higher the emissions and combustion temperatures produced. While excess air has an

inverse relationship with the combustion temperature. The bigger the percentage of excess air added, the lower the combustion temperature achieved. The results of this research also show that the lowest CO₂ and N₂ emissions were generated at a feeding rate of 2 kg/hour in all variations of excess air. With 6.764 kgCO₂/hour and 20.585 kgN₂/hour are generated. While the highest combustion temperature achieved is 1185.271 Celsius with 31 kg/hour feeding rate at 5% excess air. For all variations of feeding rate the DRE values obtained having the same value, in which 99.96%.

Keywords: polystyrene incineration, DRE, feeding rate, excess air, emission

KATA PENGANTAR

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT karena berkat rahmat dan karunia-Nya, Laporan Tugas Akhir yang berjudul “Kajian Pembakaran Sampah Plastik *Polystyrene* (PS) terhadap Emisi, Suhu Pembakaran, dan *Destruction Removal Efficiency* (DRE) pada Insinerator” dapat diselesaikan. Pada kesempatan ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan semangat, bimbingan, dan nasehat dalam penyusunan dan penulisan proposal tugas akhir terutama kepada:

1. Bapak Prof. Ir. Joni Hermana, M.Sc.Es., Ph.D selaku dosen pembimbing tugas akhir yang telah membimbing, memberi masukan, dan arahan selama proses penelitian dan penyusunan Tugas Akhir.
2. Seluruh dosen pengarah yang telah memberikan arahan, saran, dan masukan selama proses pengerjaan Tugas Akhir.
3. Daddy yang selalu memberikan semangat lewat mimpi.
4. Ibu dan kakak-kakak kandung penulis yang telah menjadi motivasi dan senantiasa memberikan doa untuk kelancaran penyusunan Tugas Akhir ini.
5. Teman-teman bimbingan Tugas Akhir dan teman-teman angkatan 2016 yang telah bekerja sama dan saling mengingatkan satu sama lain terkait asistensi dan kemajuan dari Tugas Akhir.
6. Teman-teman penulis yang berada di Bandung yang selalu memberi semangat selama pengerjaan Tugas Akhir ini.

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 dan pembaca.

Surabaya, Juli 2020

Penulis

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Ruang Lingkup	3
1.5 Manfaat Penelitian	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Teknologi Termal	5
2.1.1 Gasifikasi	5
2.1.2 Pirolisis	6
2.1.3 Pembakaran (Insinerasi)	7
2.1 Insinerator	8
2.2.1 Proses yang Terjadi pada Insinerator	8
2.2.2 Jenis-jenis Insinerator	9
2.2.3 Kelebihan dan Kelemahan Insinerator	13
2.3 Faktor yang Mempengaruhi Proses Insinerasi	14
2.3.1 Temperature	14
2.3.2 Turbulence	15
2.3.3 Time	15
2.3.4 Feeding Rate	16
2.3.5 Excess Air (Udara Berlebih)	16
2.4 Emisi	17
2.5 Destruction Removal Efficiency (DRE)	18
2.6 Plastik	19
2.7 Plastik Polystyrene	21
2.8 Insinerator Departemen Teknik Lingkungan ITS	25
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	29
3.1 Kerangka Penelitian	29
3.2 Tahap Awal	31

3.2.1 Identifikasi Masalah	31
3.2.2 Studi Literatur	31
3.3 Tahap Penelitian	32
3.3.1 Perhitungan Destruction Removal Efficiency (DRE)	35
3.3.2 Perhitungan Emisi yang Dihasilkan Berdasarkan Persamaan Desain Insinerator	35
3.3.3 Perhitungan Suhu Pembakaran	38
3.4 Tahap Akhir	39
3.4.1 Kesimpulan dan Saran	39
BAB 4 Hasil dan Pembahasan	41
4.1 Analisis Karakteristik Kimia Sampah Polystyrene.....	41
4.1.1 Proximate Analysis	43
4.1.2 Ultimate Analysis	44
4.2 Stoikiometri Reaksi Pembakaran Sampah Plastik Polystyrene	46
4.3 Pengaruh Feeding Rate terhadap nilai Destruction Removal Efficiency (DRE)	47
4.4 Pengaruh Variasi Feeding Rate dan Excess Air Terhadap Emisi yang Dihasilkan dengan Persamaan Desain Insinerator	51
4.5 Pengaruh Variasi Feeding Rate dan Excess Air terhadap Suhu Pembakaran	58
BAB 5 PENUTUP	63
5.1 Kesimpulan.....	63
5.2 Saran.....	65
DAFTAR PUSTAKA.....	67
LAMPIRAN	71
I. Perhitungan Berat Oksigen Stoikiometri berdasarkan	
II. Kesetimbangan Mol	71
III. Perhitungan Total Heat Input	79
IV. Perhitungan Total Moisture.....	80
V. Hasil Perhitungan CO ₂ , N ₂ , dan Excess Air yang Terbentuk.....	86

VI. Hasil Perhitungan Suhu Pembakaran	91
BIOGRAFI PENULIS	101

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR TABEL

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Kelebihan dan Kekurangan Insinerator	13
Tabel 2. 2 Jenis Plastik dan Kegunaannya	19
Tabel 2. 3 Karakteristik Kimia Plastik <i>Polystyrene</i> berdasarkan <i>Proximate</i> dan <i>Ultimate Analysis</i>	22
Tabel 3. 1 Variabel Penelitian	33
Tabel 4. 1 Moisture Analysis	41
Tabel 4. 2 Karakteristik Kimia Plastik <i>Polystyrene</i>	43
Tabel 4. 3 Proximate Analysis	43
Tabel 4. 4 Ultimate Analysis	44
Tabel 4. 5 Rumus Kimia Sampah Plastik	44
Tabel 4. 6 Rumus Kimia Sampah Plastik	45
Tabel 4. 7 Rumus Kimia Sampah Plastik	45
Tabel 4. 8 Pengaruh Variasi <i>Feeding Rate</i> terhadap Nilai DRE49	

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR GAMBAR

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Proses Pirolisis	6
Gambar 2. 2 Perbedaan Pirolisis, Gasifikasi, dan Insinerasi dilihat dari Suplai Udara	8
Gambar 2. 3 Proses Pembakaran pada Insinerator	9
Gambar 2. 4 Rotary Kiln	10
Gambar 2. 5 Moving Grate	11
Gambar 2. 6 Fluidized Bed	12
Gambar 2. 7 Polimerisasi Styrene Menjadi <i>Polystyrene</i>	21
Gambar 2. 8 Cover CD dari GPPS	23
Gambar 2. 9 Kemasan Cemilan dari HIPS	24
Gambar 2. 10 Kontainer dari EPS	24
Gambar 2. 11 Insinerator Departemen Teknik Lingkungan ITS	25
Gambar 3. 1 Kerangka Penelitian	30
Gambar 4. 1 Pengaruh Variasi <i>Feeding Rate</i> dan <i>Excess Air</i> terhadap CO ₂ yang Dihasilkan	54
Gambar 4. 2 Pengaruh Variasi <i>Feeding Rate</i> dan <i>Excess Air</i> terhadap N ₂ yang Dihasilkan	56
Gambar 4. 3 Pengaruh Variasi <i>Feeding Rate</i> dan <i>Excess Air</i> terhadap N ₂ yang Dihasilkan	57
Gambar 4. 4 Pengaruh Variasi <i>Feeding Rate</i> dan <i>Excess Air</i> terhadap Suhu Pembakaran	60

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR LAMPIRAN

DAFTAR LAMPIRAN

Tabel I. 1 Berat Oksigen Stoikiometri.....	72
Tabel II. 1 Total Heat Input.....	79
Tabel III. 1 Total Moisture untuk Excess Air 5%.....	81
Tabel III. 2 Total Moisture untuk Excess Air 15%.....	82
Tabel III. 3 Total Moisture untuk Excess Air 25%.....	84
Tabel IV. 1 CO ₂ , N ₂ , dan Excess Air yang Terbentuk pada Penambahan Excess Air 5%.....	86
Tabel IV. 2 CO ₂ , N ₂ , dan Excess Air yang Terbentuk pada Penambahan Excess Air 15%.....	87
Tabel IV. 3 CO ₂ , N ₂ , dan Excess Air yang Terbentuk pada Penambahan Excess Air 25%.....	89
Tabel V. 1 Suhu Pembakaran pada Semua Variasi <i>Feeding Rate</i> dan <i>Excess Air</i> 5%	91
Tabel V. 2 Suhu Pembakaran pada Semua Variasi <i>Feeding Rate</i> dan <i>Excess Air</i> 15%	94
Tabel V. 3 Suhu Pembakaran pada Semua Variasi <i>Feeding Rate</i> dan <i>Excess Air</i> 25%	97

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Metoda pengolahan sampah di Indonesia masih megandalkan *final disposal* (pembuangan akhir) ke TPA. Dimana pada TPA sampah langsung ditimbun begitu saja. Menurut Thariq (2019), sampah plastik yang terakumulasi di TPA dapat memperpendek umur TPA karena sifatnya yang tidak mudah diuraikan oleh mikroorganisme. Pada tahun 2016, Kota Surabaya menghasilkan sekitar .1500 ton sampah per hari, dimana 1.281 ton dari sampah tersebut masuk ke TPA. Dari total sampah yang masuk ke TPA tersebut, sebanyak 204,96 ton (sekitar 16%) per harinya adalah sampah plastik (CCET,2016).

Salah satu hal yang menyebabkan besarnya timbulan sampah plastik adalah masih maraknya penggunaan *single-use plastic*. *Single-use plastic* ini sering kali digunakan sebagai bungkus makanan. Apalagi dengan maraknya sistem pesan-antar makanan melalui aplikasi *online*, sampah *single-use plastic* yang digunakan untuk bungkus makanan semakin bertambah. Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan oleh lembaga riset Nielsen, dari 1000 responden yang berasal dari penduduk di Kota Jakarta, Bandung, Yogyakarta, Surabaya, Balikpapan, dan Medan, 58%-nya merupakan pengguna jasa pesan-antar makanan melalui aplikasi online (Tirto.id, 2019). Sedangkan di Kota Surabaya sendiri menurut data yang dimiliki oleh Go-Food (salah satu penyedia layanan pesan-antar makanan secara *online*), tercatat sebanyak 767 ribu transaksi pesan-antar makanan terjadi (Suara Surabaya, 2018). *Polystyrene* merupakan salah satu jenis plastik yang banyak digunakan untuk alat makan sekali pakai maupun sebagai kemasan makanan. Walaupun pada hakikatnya semua plastik bisa didaur ulang, tapi pada praktiknya banyak jenis sampah yang memerlukan biaya daur ulang yang mahal serta menghasilkan produk daur ulang yang kurang berkualitas (The Guardian, 2019). Menurut Metro.co.uk (2018), diperlukan biaya yang tinggi dan bangunan logistik yang kompleks untuk bisa mendaur ulang *Polystyrene*, selain itu hanya *Polystyrene* jenis *Expanded Polystyrene* (EPS) saja yang 100% *recyclable*.

Salah satu metoda yang efektif untuk *removal* volume dan berat sampah yaitu metoda insinerasi, dimana metoda ini bisa menurunkan volume sampah hingga lebih dari 90% dan menurunkan berat sampah hingga lebih dari 70% (EPA,1992). Insinerasi adalah metoda pembakaran sampah pada suhu tinggi yang bertujuan untuk *removal* sampah baik itu volume maupun beratnya dengan menggunakan alat yang disebut insinerator (BPPT, 2016). Faktor utama yang mempengaruhi proses insinerasi pada insinerator adalah *temperature*, *residence time*, dan *turbulence* (3T). Selain 3T terdapat juga faktor-faktor operasi yang perlu diperhatikan seperti *feeding rate* dan *excess air*. Menurut Basel Convention (1997) *feeding rate* berpengaruh pada nilai *residence time* dalam keadaan suhu yang konstan. Sedangkan *excess air* berkaitan dengan dengan derajat mixing dan juga suhu pembakaran.

Salah satu aspek yang saat ini menjadi perdebatan adalah gas buang yang dihasilkan dari proses pembakaran sampah pada insinerator. Menurut Prasetyadi *et al.* (2018), komposisi utama pada gas buang yang belum diolah dari insinerator untuk sampah kota yaitu SO₂, NO_x, CO, gas asam HF dan HCl, partikulat, logam berat seperti Hg, Cd, dan beberapa *trace element* serta Dioksin/Furans (PCDD/PCDF). Akan tetapi, secara teori, apabila dioperasikan dengan baik dan terjadi *complete combustion*, kandungan polutan pada gas buang insinerator bisa dimusnahkan. Seperti insinerator yang ber-operasi pada suhu 700 °C hingga 820°C bisa mengubah karbon monoksida menjadi karbon dioksida (Vallero, 2008). Berdasarkan *Technical Document for Batch Waste Incineration the Government of Canada*, telah diketahui bahwa pada suhu 600 °C dioksin dan furan bisa dimusnahkan.

Penelitian ini mengkaji pengaruh variasi *feeding rate* dan *excess air* pembakaran sampah plastik *Polystyrene* pada insinerator. Pengaruh kedua variasi ini dikaji terhadap parameter emisi dari proses pembakaran, suhu pembakaran, dan *destruction removal efficiency* (DRE).

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas maka dirumuskan beberapa rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh variasi *feeding rate* terhadap emisi, suhu pembakaran, dan *Destruction Removal Efficiency* (DRE)?
2. Bagaimana pengaruh *excess air* terhadap emisi, suhu pembakaran, dan *Destruction Removal Efficiency* (DRE)?
3. Bagaimana kondisi yang tepat dalam menghasilkan emisi paling rendah, suhu pembakaran paling tinggi, dan nilai *Destruction Removal Efficiency* (DRE) paling tinggi?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengkaji pengaruh variasi *feeding rate* terhadap emisi, suhu, dan *Destruction Removal Efficiency* (DRE)
2. Mengkaji pengaruh variasi *excess air* terhadap suhu pembakaran dan emisi yang dihasilkan dari insinerasi.
3. Menentukan kondisi yang dapat menghasilkan emisi paling rendah, suhu pembakaran paling tinggi, dan nilai *Destruction Removal Efficiency* (DRE) paling tinggi

1.4 Ruang Lingkup

Ruang lingkup penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Parameter emisi, suhu pembakaran, serta *destruction removal efficiency* (DRE) dikaji berdasarkan perhitungan matematis serta teori dan hasil penelitian pada literatur.
2. Pembakaran sampah plastik *Polystyrene* yang dimaksud adalah pembakaran sempurna dengan udara berlebih (insinerasi).

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Menghasilkan rekomendasi metoda pembakaran untuk operasional Insinerator Departemen Teknik Lingkungan ITS yang lebih optimal.

Menjadi referensi pengembangan teknologi insinerator Departemen Teknik Lingkungan ITS selanjutnya

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Teknologi Termal

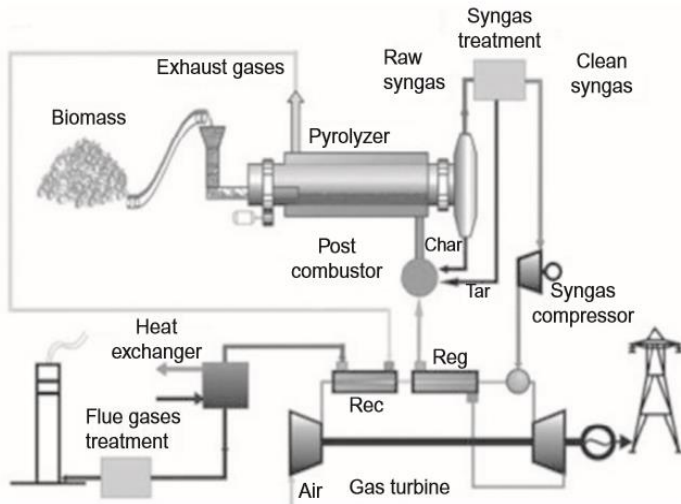
Pengolahan dengan teknologi termal relatif terjadi pada suhu yang tinggi, dimana dalam prosesnya terjadi perubahan struktur kimia dari sampah yang diolah. Teknologi ini bertujuan untuk mendestruksi sampah menjadi bahan yang lebih stabil. Dalam proses ini sampah dikonversi menjadi gas, cairan, dan produk dalam bentuk padatan yang secara bersamaan atau kemudian melepaskan energi panas (Hanif, 2018). Maka dari itu salah satu keuntungan dari teknologi ini adalah adanya potensi *energy recovery*. Selain itu, teknologi ini juga dinilai efektif dalam mereduksi volume sampah, yaitu dalam kisaran 70% - 90%. Berdasarkan tingkat oksidasinya, teknologi termal dapat diklasifikasikan menjadi pembakaran (insinerasi), gasifikasi, dan pirolisis.

2.1.1 Gasifikasi

Secara luas gasifikasi bisa didefinisikan sebagai konversi termokimia dari material berbasis karbon, baik itu padatan ataupun cairan menjadi gas yang mudah terbakar dengan bantuan *gasification agent* (Sam dan Barik, 2019). *Gasification agent* yang umum digunakan yaitu berupa uap. Gas yang dihasilkan disebut *syngas*, dimana komposisinya biasanya terdiri dari CO, CO₂, H₂O, CH₄, gas *inert* yang berasal dari *gasification agent*, hidrokarbon dalam jumlah sedikit, serta kontaminan lain seperti *char*, abu, dan *tars*. Agar gasifikasi lebih efisien maka dibutuhkan material berbasis karbon yang homogen dalam jumlah yang cukup. Sampah yang akan diolah dengan gasifikasi memerlukan *pre-treatment* yang biasanya ditujukan untuk menghasilkan bentuk dan ukuran yang lebih konsisten. Suatu sistem gasifikasi biasanya memiliki *gasifier* yang berfungsi untuk membantu produksi gas mudah terbakar dan *gas clean-up system* yang berfungsi untuk menghilangkan senyawa berbahaya dalam gas yang dihasilkan.

2.1.2 Pirolisis

Pirolisis merupakan proses pengolahan secara termal tanpa adanya oksigen. Menurut Hanif (2018), tujuan dari pirolisis yaitu dekomposisi termal limbah padat menjadi gas dan fase padat. Proses ini menggunakan dekomposisi termokimia dalam keadaan kekurangan oksigen yang terjadi pada kisaran suhu 500 °C - 800 °C. Pirolisis memerlukan sumber panas dari luar. Hasil dari pirolisis dapat berupa syngas, minyak pirolisis (bahan bakar), residu padat (arang), dan residu abu. Jumlah produk dan proporsinya bergantung pada suhu pirolisis dan laju pemanasan. Proses pirolisis dapat dilihat pada Gambar 2.1.

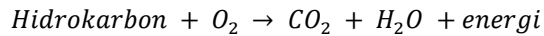


**Gambar 2. 1 Proses Pirolisis
(Sam dan Barik, 2019)**

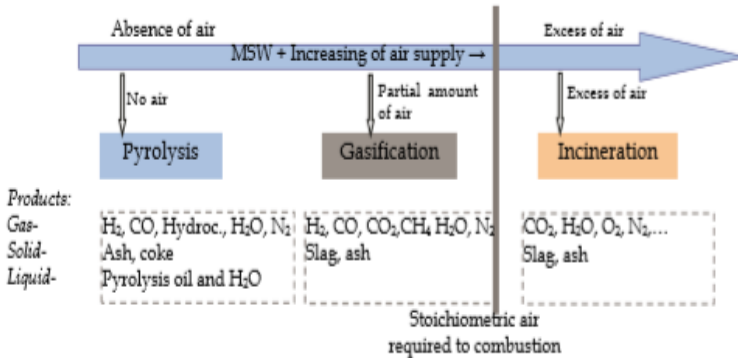
2.1.3 Pembakaran (Insinerasi)

Secara teori proses pembakaran terjadi apabila terdapat materi yang dibakar atau *fuel*, adanya oksigen, dan adanya panas (Auburn University). Insinerasi adalah pembakaran sampah langsung dengan kadar oksigen yang tinggi untuk mendestruksi senyawa organik. Insinerasi merupakan alternatif teknologi termal yang paling banyak digunakan. Insinerasi limbah padat bertujuan untuk mengurangi volume sampah. Proses ini bisa mengurangi volume sampah hingga 90% dan berat sampah hingga 75%.

Insinerasi menghasilkan produk sampingan berupa abu dan *flue gas*. Menurut Vallero (2011), secara umum reaksi kimia yang terjadi pada pembakaran sempurna adalah sebagai berikut:



Komposisi *flue gas* yang dihasilkan sangat bergantung pada senyawa penyusun limbah yang dibakar. Hal ini memungkinkan adanya senyawa selain CO₂ yang terkandung pada *flue gas* hasil insinerasi. Bahkan *flue gas* bisa saja mengandung senyawa yang lebih berbahaya dibandingkan senyawa aslinya, seperti dioksin, furan, *polycyclic aromatic hydrocarbons* (PAHs) dan CO (Vallero, 2011). Oleh karena itu insinerasi harus berlangsung pada suhu >850°C dengan suplai udara yang cukup untuk memastikan proses pembakaran sempurna terjadi dan mencegah pembentukan dioksin serta karbon monoksida, serta perlu dilengkapi dengan *air pollution control device* untuk destruksi kandungan polutan lainnya.



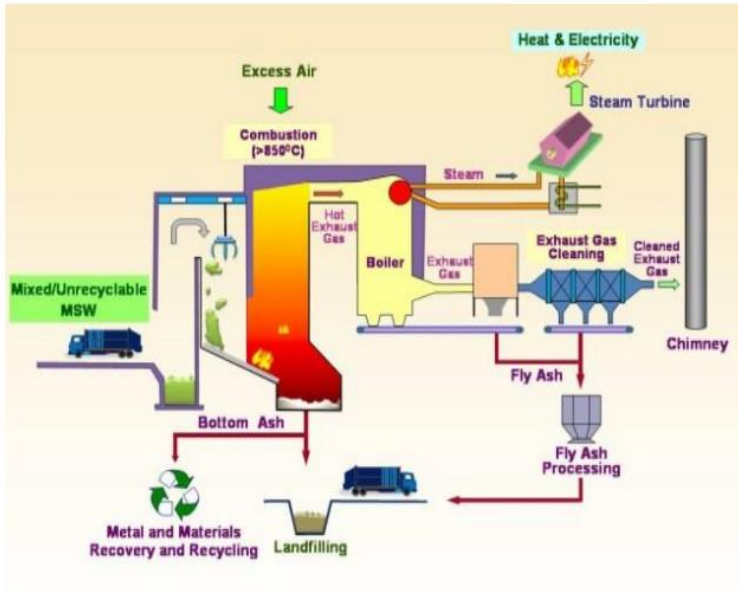
Gambar 2. 2 Perbedaan Pirolisis, Gasifikasi, dan Insinerasi dilihat dari Suplai Udara
Sumber: DEFRA, 2007

2.2 Insinerator

Alat untuk proses insinerasi disebut sebagai insinerator. Insinerator biasanya dirancang untuk pembakaran oksidatif penuh pada kisaran suhu 850°C hingga 1.400°C. Pada aplikasi insinerator bahan bakar utama ialah sampah yang dibakar, walaupun untuk kondisi tertentu biasanya dilakukan *co-firing* dengan bahan bakar tambahan. Sedangkan sumber oksigen didapatkan dari udara.

2.2.1 Proses yang Terjadi pada Insinerator

Secara umum, proses pembakaran pada insinerator diawali dengan penguapan kandungan air dari sampah yang dibakar dengan panas yang dihasilkan dari bahan bakar tambahan yang digunakan. Setelah itu pemanasan sampah, dimana pada tahap ini terjadi destruksi dan pelepasan karbon atau *volatile material* yang kemudian terkonversi menjadi gas. Apabila dilakukan pembakaran lanjutan, gas yang dihasilkan kemudian akan teroksidasi dengan oksigen yang berasal dari udara yang disuplai. Oksidasi ini mampu menghasilkan suhu yang lebih tinggi, sehingga mendukung terjadinya pembakaran sempurna.



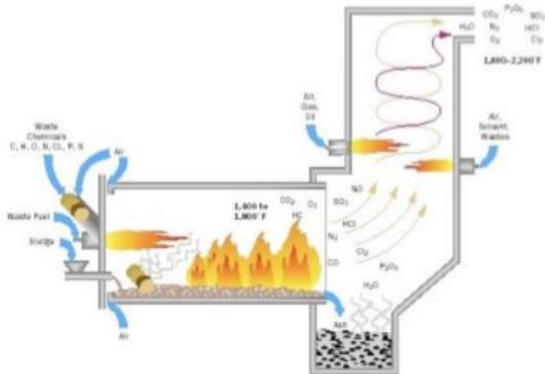
Gambar 2. 3 Proses Pembakaran pada Insinerator (Nidoni, 2017)

Setelah dari proses pembakaran, suhu gas akan diturunkan kembali. Dimana panas yang dilepaskan pada tahap ini biasanya dimanfaatkan untuk *heat recovery* melalui pembentukan uap. Gas yang telah diturunkan suhunya akan diolah dengan *air pollution control device* untuk menghilangkan ataupun mereduksi kandungan polutannya, sebelum kemudian gas ini dilepaskan ke atmosfer melalui *stack*.

2.2.2 Jenis-jenis Insinerator

Secara umum ada tiga jenis insinerator menurut Nidoni (2017). Ketiga jenis insinerator tersebut adalah sebagai berikut:

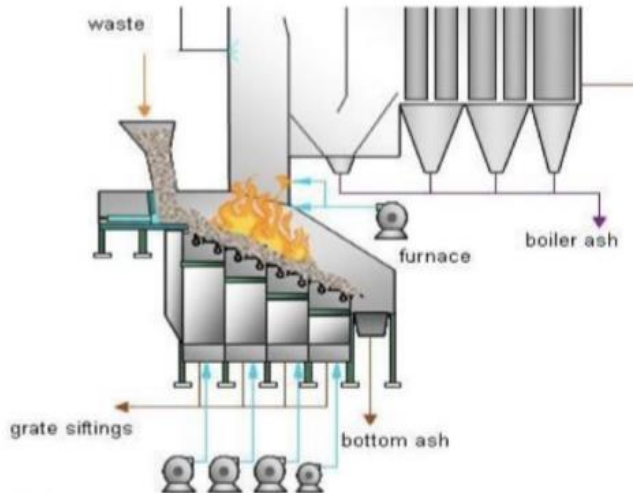
1. Rotary Kiln



**Gambar 2. 4 Rotary Kiln
(Nidoni, 2017)**

Insinerator jenis ini memiliki dua ruang *thermal treatment*. Pertama yaitu *primary chamber* yang posisinya sedikit dimiringkan sebagai tempat masuknya sampah bersamaan dengan udara panas dan oksigen. Kedua, *secondary chamber* yang berputar dan merupakan ruang dekomposisi termal. Ruangan pembakaran ulang ini terdapat pada ujung *kiln* dimana sisa sampah terbakar sepenuhnya oleh suplai udara dari *secondary chamber*. *Rotary kiln* biasanya digunakan untuk membakar limbah industri dan limbah B3. Keuntungan dari insinerator ini yaitu menghasilkan NO_x dalam jumlah yang sedikit dan destruksi termal zat kimia yang berbahaya.

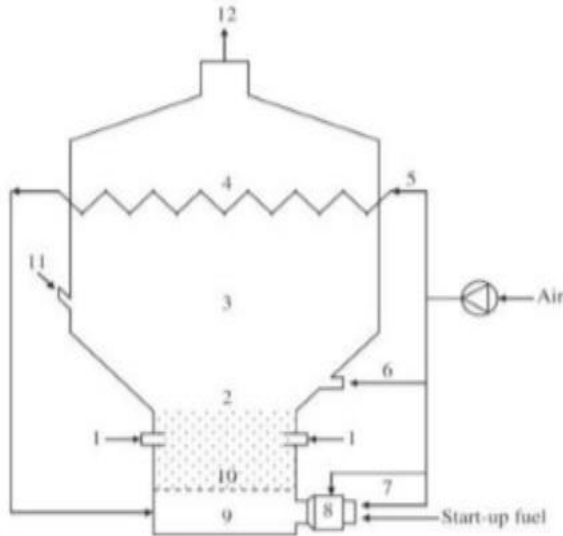
2. Moving Grate



**Gambar 2. 5 Moving Grate
(Nidoni, 2017)**

Moving grate merupakan desain tipikal untuk insinerator sampah kota. Pada insinerator ini sampah dijatuhkan pada *descending grate* menggunakan *crane*. Sampah lalu bergerak menuju ruang pembakaran yang kemudian residunya jatuh pada *ash pit* yang terdapat di ujung lain *grate*. *Moving grate* merupakan *bed* logam berlubang yang memungkinkan udara *primary combustion* mengalir masuk dari bagian bawah. Udara *secondary combustion* yang disuplai oleh *nozzle* yang berada di atas *grate* berfungsi untuk memfasilitasi pembakaran sempurna dengan menciptakan turbulensi.

3. Fluidized Bed



Gambar 2. 6 Fluidized Bed
(Nidoni, 2017)

Insinerator *fluidized bed* biasanya digunakan untuk limbah B3, namun akhir-akhir ini juga digunakan untuk sampah kota. Prinsip kerja dari insinerator *fluidized bed* yaitu: partikel sampah tersuspensi oleh udara pembakar yang mengalir keatas dari bagian bawah sehingga seperti fluida, dimana dengan cara ini akan dihasilkan turbulensi untuk meningkatkan *uniform mixing* dan transfer panas, sehingga efisiensi pembakaran juga meningkat. Keuntungan dari insinerator jenis ini adalah peningkatan efisiensi pembakaran, akan tetapi sampah yang masuk harus memiliki ukuran dan *heat value* yang homogen.

Apabila dibedakan dari sistem pengumpannya, insinerator dapat dibagi menjadi tiga jenis. Yaitu *batch incinerator*, *continuous incinerator*, dan *semi-batch incinerator*. Pada insinerator dengan

sistem *batch feeding*, sampah dengan jumlah tertentu dimasukkan sekaligus dan proses pada insinerator harus berjalan hingga selesai terlebih dahulu sebelum memulai pembakaran *batch* selanjutnya. Sementara itu, pada insinerator dengan sistem *continuous feeding*, sampah dimasukkan secara terus menerus diiringi dengan proses pada insinerator yang juga terus berjalan. Sedangkan pada *semi-batch* insinerator sampah ditambahkan sebanyak berat yang sama pada interval waktu yang ditentukan selama proses pembakaran berlangsung.

2.2.3 Kelebihan dan Kelemahan Insinerator

Menurut Quina et al. (2011), Vallero (2011), dan Green Garage (2016) berikut adalah kelebihan dan kelemahan dari pengolahan sampah padat dengan insinerator.

Tabel 2. 1 Kelebihan dan Kekurangan Insinerator

Kelebihan	Kekurangan
Mengurangi kebutuhan landfill	Emisi polusi udara yang bisa saja menghasilkan <i>toxic</i> dan <i>acid gases</i>
Potensi energy recovery	Menghasilkan asap
Mereduksi volume sampah hingga 90%	Memerlukan biaya yang tinggi untuk dalam hal investasi, operasi, dan perawatan. Apalagi ketika insinerator memerlukan bahan bakar
Mereduksi berat sampah hingga 70%	Banyak faktor operasi yang harus dikontrol agar pembakaran terjadi dengan sempurna
Mengurangi biaya transportasi sampah	Bisa menghasilkan APC residues apabila sampah yang dibakar merupakan limbah B3
Tidak memerlukan lahan luas	Memerlukan pekerja dengan keahlian tinggi untuk mengoperasikan insinerator
Emisi dari <i>stack</i> tidak berbau	
Mereduksi materi organik utamanya menjadi CO ₂ dibandingkan tereduksi menjadi CH ₄ dan VOC lainnya	

Proses yang terjadi dalam insinerator menghasilkan emisi polutan yang terkadang bisa mengandung polutan yang berbahaya apabila sampah yang memang mengandung materi yang berbahaya seperti *chlorine* yang bisa menghasilkan dioksin dari reaksi pembakaran. Atau ketika faktor operasi gagal dikontrol dengan baik, sehingga menghasilkan *products of incomplete combustion* (PICs). Maka diperlukan adanya *air pollution control device* (APCD) pada suatu instalansi pengolahan sampah dengan insinerator ini. Beberapa insinerator modern ada yang sudah dilengkapi dengan filter gas asam dan asap. Menurut National Research Council (2000), penggunaan beberapa APCD pada suatu instalansi insinerasi di Eropa mampu mereduksi emisi lebih baik dari perkiraan. Tentunya kebutuhan akan APCD juga meningkatkan biaya yang diperlukan.

2.3 Faktor yang Mempengaruhi Proses Insinerasi

Dalam meningkatkan proses pembakaran, peran prinsip 3T (*temperature, turbulence, time*) sangat penting. Temperatur, turbulensi, dan waktu memiliki perbandingan lurus terhadap pembakaran. Semakin tinggi temperatur, semakin meningkatnya turbulensi dan semakin lamanya waktu tinggal *flue gas* dan sampah maka proses pembakaran juga akan meningkat. Semakin tinggi temperatur, semakin meningkatnya turbulensi dan semakin lamanya waktu tinggal *flue gas* dan sampah maka proses pembakaran juga akan meningkat. Untuk insinerator tipe grate, ketentuan yang berhubungan dengan prinsip 3 T adalah waktu tinggal sampah dalam grate insinerasi kurang dari 60 menit, waktu tinggal gas lebih dari 2 detik dan suhu gasnya lebih dari 850 °C. Selama proses pembakaran, persediaan udara harus cukup agar proses pembakaran sampah berlangsung secara sempurna (Charles et al., 2010)

2.3.1 Temperature

Dari prinsip 3T, *temperature* adalah aspek yang paling penting dalam proses insinerasi. Menurut Essenhigh (1986), perubahan kecil pada suhu dapat berpengaruh pada efisiensi pembakaran secara signifikan. Suhu yang dicapai dari proses oksidasi yang terjadi pada pembakaran harus dijaga agar cukup

tinggi untuk memastikan terjadinya pembakaran sempurna akan tetapi tidak terlalu tinggi untuk mencegah pembentukan NO_x serta tetap sesuai kapasitas operasi ruang pembakaran. Suhu pembakaran bisa diatur dengan membatasi jumlah sampah yang dimasukkan kedalam ruang pembakaran agar suhu yang dihasilkan masih didalam kapasitas operasi yang telah ditentukan. Kemudian kondisi yang dihasilkan bisa diperbaiki dengan memvariasikan udara berlebih.

Semakin tinggi suhu insinerasi, maka proses pembakaran yang terjadi akan lebih sempurna dan polutan seperti dioksin dapat direduksi secara efektif. Insinerasi dengan dua tahap pembakaran melalui *secondary chamber* sangat disarankan agar bisa meningkatkan pembakaran *flue gases*.

2.3.2 Turbulence

Turbulence yang dimaksud adalah pencampuran merata antara udara dan sampah yang dibakar. Metoda yang digunakan untuk menciptakan *turbulence* pada insinerator yaitu melalui peningkatan kecepatan udara yang disuplai dan perubahan arahnya. Peningkatan *turbulence* tanpa penurunan suhu insinerasi mampu mengurangi waktu yang dibutuhkan untuk pembakaran sempurna. Pengoperasian insinerator yang baik terindikasi ketika terdapat udara yang cukup pada ruang pembakaran dan ketika gas-gas yang ada tercampur.

2.3.3 Time

Waktu yang diperlukan untuk pembakaran sempurna pada sampah merupakan fungsi dari *temperature* dan *turbulence*. Untuk mencapai pembakaran yang optimal, setiap aliran gas harus mencapai suhu tinggi yang cukup selama beberapa waktu. Menurut Feuss dan Flower (1969), setidaknya dibutuhkan 0,5 detik pada suhu 1400°F (760°C) untuk pembakaran sempurna *obnoxious gases*.

Selain prinsip 3T, aspek penting dalam sistem insinerasi adalah nilai kandungan energi (*heating value*) sampah. Selain menentukan kemampuan dalam mempertahankan berlangsungnya proses pembakaran, *heating value* juga

menentukan banyaknya energi yang dapat diperoleh dari sistem insinerasi.

2.3.4 Feeding Rate

Menurut beberapa literatur *feeding rate* menjadi indikator operasi yang penting dalam insinerasi untuk menunjang efisiensi pembakaran. *Feed rate* perlu diukur untuk menentukan tingkat destruksi dan *removal*. Untuk itu biasanya dilakukan beberapa kali percobaan pembakaran untuk menentukan batas nilai *feed rate* yang optimum sebelum insinerator benar-benar dioperasikan. Dimana batas nilai *feeding rate* dipengaruhi oleh *calorific value* dari sampah. Sebaiknya *feeding rate* ini tidak melebihi kapasitas yang telah didesain berdasarkan dari percobaan pembakaran yang telah dilakukan. Menurut Basel Convention (1997) *feeding rate* menjadi salah satu variabel yang bisa mengontrol *residence time* sampah dalam keadaan suhu yang konstan.

Dalam buku "*Waste Incineration and Public Health*" oleh National Research Council (2000), kondisi stabil dimana tidak terjadi fluktuasi *waste-feed supply rate* dan udara pembakaran yang signifikan akan mendukung kondisi pembakaran yang efisien.

Berdasarkan buku panduan *On-site Incineration* yang dikeluarkan oleh EPA (1998), *waste feed* berhubungan dengan konsentrasi senyawa organik dan *calorific value* yang berakibat pada ketersediaan udara berlebih yang dapat menunjang terjadinya pembakaran sempurna. Pada insinerator jenis *rotary kiln*, *feeding* yang berlebihan dapat mengakibatkan tekanan berlebih. Apabila tekanan berlebih ini terus terjadi maka dapat menyebabkan pelepasan gas yang belum diolah melauhi celah ataupun saluran pada insinerator.

2.3.5 Excess Air (Udara Berlebih)

Reaksi oksidasi pada pembakaran membutuhkan suplai oksigen yang cukup (kebutuhan oksigen teoritis) untuk menghasilkan suhu yang optimum. Dalam *praktiknya mixing* dan pembakaran yang sempurna sulit dicapai karena kenyataannya tidak semua molekul oksige bereaksi dengan unsur-unsur bahan

bakar. Kekurangan suplai udara dapat menyebabkan semakin banyaknya bahan bakar yang tidak terbakar dan terbuang begitu saja melalui *stack*. Dengan adanya *excess air* atau udara berlebih maka dapat dipastikan terdapat cukup oksigen yang bereaksi dengan unsur-unsur pada sampah yang dibakar (Thaariq, 2019). Akan tetapi suplai udara berlebih ini harus dikontrol karena dapat menyebabkan menurunnya suhu. Semakin besar kelebihan udara maka suhu adiabatik pembakaran semakin turun, namun demikian tidak menurunkan total panas yang dipindahkan dari zona pembakaran ke tumpukan sampah pada zona pirolisa dan pengeringan (Naryono et al., 2015). Faktor yang menentukan suplai udara berlebih yang dibutuhkan dengan menentukan derajat *mixing* yang diinginkan pada ruang pembakaran dan suhu yang diinginkan, dimana suhu ini harus cukup tinggi untuk memungkinkan terjadinya pembakaran sempurna (Basel Convention, 1997).

2.4 Emisi

Secara prinsip produk dari reaksi pembakara adalah CO₂, uap air, dan abu. Dimana secara berurutan ketiganya merupakan hasil oksidasi karbon, hydrogen, dan materi yang tidak dapat terbakar dalam bahan bakar. akan tetapi, Ketika reaksi pembakaran tidak terjadi secara optimal, unsur-unsur lain yang berbahaya bisa saja dihasilkan. Jenis polutan yang dihasilkan dari proses insinerasi bergantung pada jenis proses, jenis sampah yang dibakar, dan kondisi pembakaran. Menurut National Reasearch Council (2000), polutan-polutan dari proses insinerasi dihasilkan dari tiga sumber. Ketiga sumber tersebut yaitu: polutan atau unsur pembentuknya terdapat pada sampah yang dibakar, polutan-polutan tersebut terbentuk pada saat proses pembakaran karena pembakaran tidak sempurna, atau polutan-polutan tersebut terbentuk dari *reformation reaction* pada bagian *gas cooling system* atau pada *Air Pollution Control Device* (APDC).

Polutan yang perlu diperhatikan karena efeknya terhadap Kesehatan manusia dan lingkungan adalah senyawa yang mengandung sulfur, nitrogen, klorin, dan logam berat. Senyawa spesifik tersebut termasuk CO, NO_x, SO_x, HCl, kadmium, timbal, merkuri, kromium, arsenic, berilium, dioksin dan furan, PCBs dan *polycyclic aromatic hydrocarbons* (PAH).

NO_x dari proses insinerasi biasa dikelan dengan thermal NO_x dan fuel NO_x. Thermal NO_x dihasilkan dari reaksi nitrogen dan oksigen yang terkandung dalam udara pembakaran. Sedangkan fuel NO_x terbentuk dari oksidasi ikatan nitrogen yang terdapat pada sampah atau bahan bakar.



2.5 Destruction Removal Efficiency (DRE)

Destruction Removal Efficiency (DRE) merepresentasikan persentase jumlah molekul dari senyawa yang terdestruksi dalam insinerator terhadap molekul senyawa yang masuk. Melalui perhitungan nilai DRE, dapat diketahui kesempurnaan proses pembakaran yang terjadi. Data yang digunakan untuk menghitung nilai DRE adalah data berat sampah yang dibakar dan data berat abu yang tersisa di ruang pembakaran utama. Hasil perhitungan nilai DRE untuk setiap *running* pembakaran sampah akan dibandingkan untuk mendapatkan nilai DRE yang paling tinggi. Berikut adalah rumus *Destruction Removal Efficiency* (DRE).


2.6 Plastik

Menurut Zhang et al. (1997), plastik awalnya terbuat dari sumber alami yaitu minyak dan gas. Akan tetapi, seiring perkembangan zaman digunakan bahan sintesis untuk memperoleh hasil plastik yang diinginkan. Berdasarkan sifat fisiknya, plastik dibagi menjadi dua jenis yaitu *thermoplastic* dan *thermosetting*. Thermoplastic adalah plastik yang bisa didaur ulang atau dilakukan pencetakan ulang dengan pemanasan kembali. Jenis-jenis plastik yang termasuk thermoplastic yaitu *Polyethylene Terephthalate* (PET), *Polystyrene* (PS), *Polycarbonate* (PC). Sedangkan plastik *thermosetting* merupakan jenis yang tidak bisa didaur ulang ataupun dicetak ulang dengan pemanasan ulang.

Tabel 2. 2 Jenis Plastik dan Kegunaannya

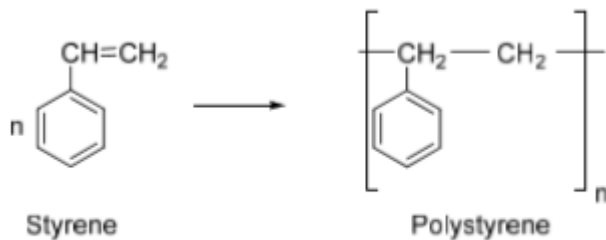
Jenis Plastik	Sifat Umum	Kegunaan
 PETE Polyethylene Terephthalate	Gas yang dihasilkan tidak berbahaya, kedap air, tahan dengan panas yang tinggi dan tahap terhadap pelarut, transparan, keras.	Botol air mineral dan minuman bersoda, pouch untuk merebus makanan, pakaian fibre dan karpet.
 HDPE High Density Polyethylene	Kedap air, tahan terhadap bahan kimia, ada yang keras dan ada yang sedikit fleksibel, kuat, permukaan seperti lilin, permeable terhadap gas, botol yang berwarna takan ditekan.	Detergen, botol pelembut dan pemutih kain, pelapis kotak sereal, wadah kompos, mainan, botol susu dan minuman tidak bersoda.

 <p>Polyvinyl Chloride</p>	<p>Transparan, keras, umumnya kaku, tahan terhadap bahan kimia, stabilitas jangka panjang, tahan terhadap cuaca, sifat listrik yang stabil, permeabilitas gas rendah.</p>	<p>Kartu kredit, pelapis karpét, bingkai pintu dan jendela, pelindung kabel, produk kulit sintteti, pipa.</p>
 <p>Low Density Polyethylene</p>	<p>Keras dan fleksibel, permukaan, permukaan seperti lilin, mudah tergores, transparan, titik leleh rendah, sifat listrik yang stabil, sifat tahan terhadap air yang baik.</p>	<p>Film, pipa irigasi, kemasan pupuk, karung, kemasan film, <i>bubble wrap</i>, plastic belanja yang tebal, pelindung kabel, tutup botol.</p>
 <p>Polypropylene</p>	<p>Ketahan terhadap bahan kimia yang baik, titik leleh tinggi, mudah tergores, keras tetapi fleksibel, permukaan seperti lilin, tembus cahaya, kuat.</p>	<p>Tutup botol, botol saus dan sirup, wadah yoghurt dan margarin, pot tanaman, sedotan, wadah untuk lemari es, kain atau fiber karpét.</p>
 <p>Polystyrene</p>	<p>Transparan hingga buram, permukaan seperti kaca, kaku atau <i>foam</i>, kaku, rapuh, terlihat jernih, bisa terpengaruhi oleh lemak dan pelarut.</p>	<p>Wadah yoghurt, karton telur, nampan <i>fast food</i>, wadah dvd/cd, alat makan sekali pakai, gantungan pakaian, mainan rapuh.</p>

	<p>Ada beberapa polimer yang memiliki banyak kegunaan terutama pada sektor teknik.</p>	<p>Nilon (PA), <i>Acrylontrien butadine styrene</i> (ABS), <i>Polycarbonate</i> (PC), <i>layered</i> atau <i>multi-material mixed polymers</i></p>
---	--	--

2.7 Plastik *Polystyrene*

Polystyrene (PS) adalah termoplastik dengan berat molekul linear tinggi yang banyak digunakan dalam berbagai aplikasi di seluruh dunia. *Polystyrene* (PS) terbentuk dari polimerisasi monomer *styrene* dalam reaksi eksotermik.



00101.0011.4108_Sec_3.CDX

Gambar 2. 7 Polimerisasi *Styrene* Menjadi *Polystyrene*

Berdasarkan sebuah studi oleh EEC Columbia pada tahun 2015, *Polystyrene* memiliki nilai *lower heating value* sebesar 38,6 MJ/kg dan *higher heating value* sebesar 40,6 MJ/kg. Nilai tersebut sangat berpotensi untuk *energy recovery*.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh *Element content* plastik *Polystyrene* dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 2. 3 Karakteristik Kimia Plastik *Polystyrene* berdasarkan *Proximate* dan *Ultimate Analysis* (Zhou et al., 2014)

Plastic subgruoup and variety		Proximate analysis			Ultimate Analysis						HHV ^d (kJ/kg)	Reference used
		A ^d	V ^d	FC ^d	C ^{daf}	H ^{daf}	O ^{daf}	N ^{daf}	S ^{daf}	Cl ^{daf}		
1.	PS	0,04	99,57	0,39							38930	
2.	PS	0,51	99,49	00,00	91,08	7,68	1,24	0,00	0,00	0,00		Li et al., 2011
3.	PS	0,01	99,39	0,69							40116	Zhang et al, 2011
4.	PS				89,02	9,00	1,80	0,00	0,00			Zhao et al., 2012
5.	PS				89,06	10,02	0,55	0,00	0,37			Feng et al., 2006
6.	PS				92,14	7,86	0,00	0,00	0,00	0,00		Miao, 2005
Mean		0,91	99,48	0,33	90,37	8,64	0,90	0,00	0,09	0,00	39523	
Minimum		0,01	99,39	0,00	89,06	7,68	0,00	0,00	0,00	0,00	38930	
Maximum		0,51	99,57	0,69	92,14	10,02	1,80	0,00	0,37	0,00	40116	

*C: carbon content; H: hydrogen content; O: oxygen content; N: nitrogen content; S: sulfur content; Cl: chlorine content; A: ash content; V: volatile content; FC: fixed carbon content; daf: dry ash free basis; d: dry basis

PS adalah resin termoplastik non-kristal, dapat dibagi menjadi *General Purpose Polystyrene* (GPPS), *High Impact Polystyrene* (HIPS), dan *Expanded Polystyrene* (EPS).

1. *General Purpose Polystyrene* (GPPS)

General Purpose Polystyrene (GPPS) biasa disebut sebagai *Polystyrene* kristal karena wujudnya yang transparan, keras, dan kaku. GPPS biasanya digunakan untuk kemasan makanan, *case* perhiasan, dan *case* CD. *Polystyrene* jenis ini memiliki nilai densitas sebesar $1040 \text{ kg/m}^3 - 1090 \text{ kg/m}^3$.



Gambar 2. 8 Cover CD dari GPPS

2. *High Impact Polystyrene* (HIPS)

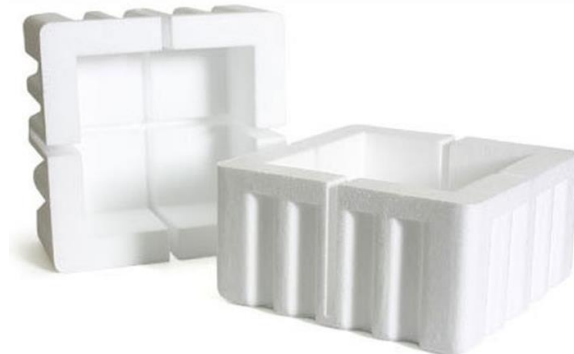
High Impact Polystyrene (HIPS) memiliki karakteristik tahan benturan, tampilan yang *matte*, dan material yang sering digunakan untuk pembentukan dengan panas. HIPS biasanya digunakan untuk *yogurt cups*. *Polystyrene* jenis ini memiliki nilai densitas sebesar $1030 \text{ kg/m}^3 - 1060 \text{ kg/m}^3$.



Gambar 2. 9 Kemasan Cemilan dari HIPS

3. Expanded *Polystyrene* (EPS)

Expanded Polystyrene (EPS) merupakan polimer yang ringan. EPS dihasilkan dari *Polystyrene* yang ditambahkan dengan *foaming agent* lalu dipanaskan hingga lunak untuk membentuk struktur *cell foam* yang rapat dan kaku. EPS banyak digunakan untuk kontainer ikan, kontainer buah-buahan, *packaging* alat-alat elektronik, dan panel insulasi pada bangunan.



Gambar 2. 10 Kontainer dari EPS

2.8 Insinerator Departemen Teknik Lingkungan ITS

Insinerator yang berada di Departemen Teknik Lingkungan ITS adalah insinerator Novai 100 BLG2 untuk sampah padat dengan kapasitas pembakaran 10 kg/jam sampah padat. Berikut adalah spesifikasi teknis dari masing-masing unit yang merupakan bagian dari Insinerator Departemen Teknik Lingkungan ITS.



Gambar 2. 11 Insinerator Departemen Teknik Lingkungan ITS

1. Unit Pembakaran Utama (Ruang Insinerasi)
 - a. Ruang Pembakaran Utama

Volume	: 0,3 m ³
Panjang	: 800 mm
Tinggi	: 1.000 mm
Lebar	: 800 mm
Bahan <i>Shell</i>	: <i>Mild Steel</i> 4 mm
<i>Linning</i>	: Batu tahan api SK 34 & <i>Ceramic Fibre</i>
Temperatur kerja	: 800°C – 1.100°C
 - b. Screen Floor

Bahan	: <i>Castable & Ceramic Fibre</i>
-------	---------------------------------------

- Lubang Udara : Diameter ½ inci 18
 - c. Penampungan Abu
 - Volume : 0,21 m³
 - d. Burner Pembakar Utama
 - Tipe : Burner pembakar utama sampah padat
 - Bahan bakar : Potongan kayu, pellet plastik, pelet kayu
 - Suplai daya : AC 220 Volt / 250 Watt
 - Merk : LATHI GENI 2 BURNER
 - Jumlah : 1 unit
 - e. Pintu Pemasukkan Sampah
 - Pintu Utama
 - Panjang : 500 mm
 - Lebar : 500 mm
 - Bahan : Konstruksi Baja
 - Linning* : *Castable & Ceramic fibre*
 - Sistem buka : Bukan sampung
 - f. Saluran Penambah Udara (*Blower*)
 - Spesifikasi : 2,5 inci, 220 Volt / 250 Watt
- 2. Unit Pembakaran Gas Buang
 - a. Ruang Bakar Gas Buang
 - Volume : 0,1 m³
 - Bahan : Konstruksi Baja
 - Linning* : *Castable & Ceramic Fibre*
 - Temperatur kerja : 800°C – 1.200°C
 - b. Burner Pembakar Utama
 - Tipe : Burner bahan bakar sampah padat
 - Bahan bakar : Potongan kayu, pellet plastik, pelet kayu
 - Merk : LATHI GENI 2 BURNER
 - Jumlah : 1 unit

3. Unit *Cooling Reactor*
 - a. Reaktor *Cooling*
 - Bahan : *Mild Steel* 6 mm
 - Linning* : BTA SK 32
 - b. *Nozzle spray*
 - Jumlah : 3 unit
 - c. *Water Pump*
 - Daya : 250Watt, 220 Volt
 - Kapasitas : 25 liter/menit
 - Merk : Wasser
4. Unit Saluran Antara
 - a. Saluran Antara
 - Bahan : SUS 304
 - Jumlah outlet : 4 unit diameter 1 inci
 - b. Venturi
 - Jumlah : 4 unit
 - c. *Water Pump*
 - Daya : 250 Watt, 220 Volt
 - Kapasitas : 25 liter/menit
 - Merk : Wasser
5. Unit *Wet Scrubber*
 - a. *Wet Scrubber*
 - Bahan : SUS 304
 - Segmen : 3 segmen
 - b. *Nozzle Spray*
 - Jumlah : 2 unit
 - c. *Water Pump*
 - Daya : 250 Watt, 220 Volt
 - Kapasitas : 25 liter/menit
 - Merk : Wasser
6. Unit Cerobong Gas Buang Akhir
 - Bahan : *MS Pipe*
 - Dimensi : Diameter 6 inci, tinggi 8 meter
7. Kebutuhan Rumah Mesin
 - Panjang : 4 meter
 - Lebar : 4 meter
 - Tinggi : 4 meter

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

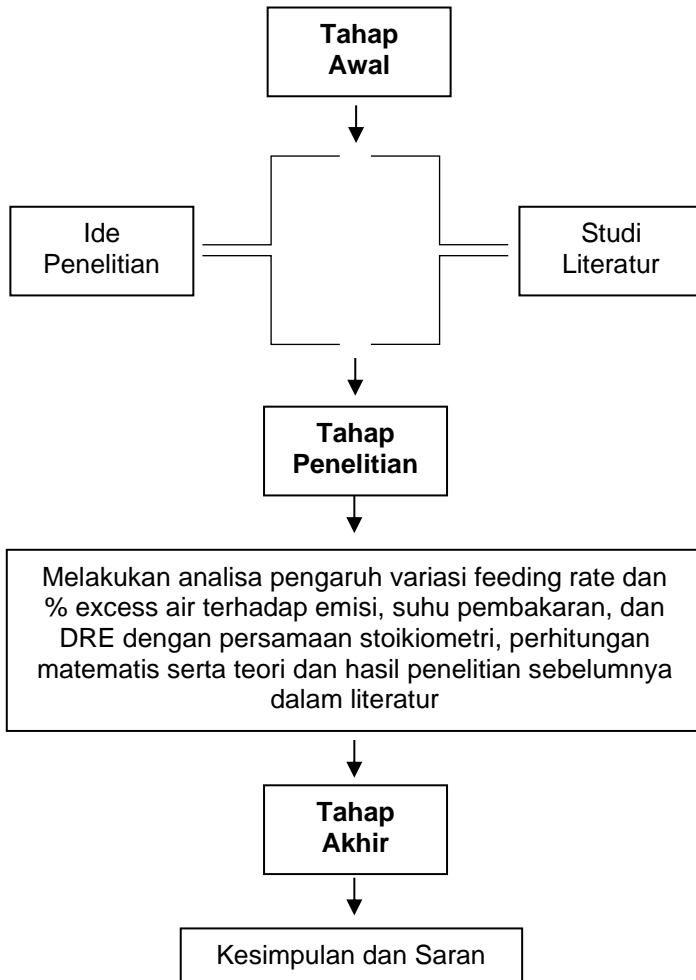
BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

BAB 3 METODE PENELITIAN

3.1 Kerangka Penelitian

Kerangka penelitian merupakan rancangan alur jalannya proses pengerjaan Tugas Akhir ini. Kerangka penelitian terdiri langkah-langkah yang bertujuan untuk mempermudah pengerjaan dan sebagai acuan dalam mengerjakan Tugas Akhir ini. Kerangka dapat dilihat pada Gambar 2.1 di bawah ini:



Gambar 3. 1 Kerangka Penelitian

3.2 Tahap Awal

Penelitian ini diawali dengan melakukan identifikasi masalah dan studi literatur. Kedua tahapan ini membantu proses perancangan keseluruhan penelitian dan menentukan hal-hal apa saja yang perlu dilakukan untuk mencapai tujuan penelitian.

3.2.1 Identifikasi Masalah

Masalah pada penelitian ini berawal dari melihat banyaknya tempat pemrosesan akhir (TPA) di Indonesia yang kondisinya sangat *over load* hingga terjadi longsor gunung sampah yang pada kasus di Leuwi Gajah memakan korban jiwa. Disisi lain penulis juga mengamati adanya perkembangan teknologi insinerasi di beberapa negara dimana teknologi ini mampu mengalihkan *trend* pengelolaan sampah untuk tidak hanya bergantung pada final disposal. Di beberapa negara maju bahkan teknologi insinerasi bisa dimanfaatkan sebagai *waste to energy* sebagai salah satu sumber listrik.

Akan tetapi pada saat pemerintah mencanangkan pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSA) pada tahun 2016 terjadi perdebatan di masyarakat mengenai masalah emisi yang dihasilkan dari kegiatan insinerasi.

Identifikasi masalah pada penelitian ini dilakukan untuk menentukan topik dan judul dari penelitian ini. Dimana identifikasi yang dilakukan bersumber dari literatur, media *online*, *website*, dan penelitian-penelitian sebelumnya yang berkaitan.

3.2.2 Studi Literatur

Studi literatur pada penelitian ini berasal dari buku, jurnal, tesis, tugas akhir, dan informasi dari *website*. Studi literatur dilakukan untuk mendapatkan dasar teori, mendapatkan informasi dari penelitian-penelitian sebelumnya, dan informasi lainnya yang berkaitan dengan penelitian ini serta bisa mendukung penelitian ini. Selain itu, studi literatur juga dapat membantu penulisan hasil analisa dan pembahasan.

Dari studi literatur ini didapatkan bahwa terdapat faktor-faktor operasi insinerator yang dapat dikontrol untuk bisa menghasilkan emisi yang lebih rendah dan meningkatkan potensi untuk *energy recovery*. Selain itu juga diketahui bahwa polutan yang terkandung

dalam emisi yang dihasilkan insinerator bisa diolah lebih lanjut dengan pengadaan *air pollution control device* (APCD) pada suatu instalansi pengolahan sampah dengan insinerasi.

3.3 Tahap Penelitian

Dengan kondisi dilanda pandemi saat ini, maka penulis tidak bisa meaksanakan penelitian insinerasi sampah plastik *Polystyrene* dengan pembakaran secara langsung pada insinerator. Hal ini berakibat pada penyesuaian variabel penelitian yang telah ditetapkan sebelumnya. Variabel penelitian yang telah disesuaikan dapat dilihat pada Tabel 3.1 berikut ini:

Tabel 3. 1 Variabel Penelitian

Feeding Rate	<i>Excess Air</i>		
	F1	F2	F3
S1	S1F1	S1F2	S1F3
S2	S2F1	S2F2	S2F3
S3	S3F1	S3F2	S3F3
S4	S4F1	S4F2	S4F3
S5	S5F1	S5F2	S5F3
S6	S6F1	S6F2	S6F3
S7	S7F1	S7F2	S7F3
S8	S8F1	S8F2	S8F3
S9	S9F1	S9F2	S9F3
S10	S10F1	S10F2	S10F3
S11	S11F1	S11F2	S11F3
S12	S12F1	S12F2	S12F3
S13	S13F1	S13F2	S13F3
S14	S14F1	S14F2	S14F3
S15	S15F1	S15F2	S15F3
S16	S16F1	S16F2	S16F3
S17	S17F1	S17F2	S17F3
S18	S18F1	S18F2	S18F3
S19	S19F1	S19F2	S19F3
S20	S20F1	S20F2	S20F3
S21	S21F1	S21F2	S21F3
S22	S22F1	S22F2	S22F3
S23	S23F1	S23F2	S23F3
S24	S24F1	S24F2	S24F3
S25	S25F1	S25F2	S25F3
S26	S26F1	S26F2	S26F3
S27	S27F1	S27F2	S27F3
S28	S28F1	S28F2	S28F3
S29	S29F1	S29F2	S29F3
S30	S30F1	S30F2	S30F3

Keterangan:

1. Excess Air (%)
 - $F1 = 5\%$
 - $F2 = 15\%$
 - $F3 = 25\%$

2. Variabel variasi *feeding rate*
 - $S1 = 2 \text{ kg/jam}$
 - $S2 = 3 \text{ kg/jam}$
 - $S3 = 4 \text{ kg/jam}$
 - $S4 = 5 \text{ kg/jam}$
 - $S5 = 6 \text{ kg/jam}$
 - $S6 = 7 \text{ kg/jam}$
 - $S7 = 8 \text{ kg/jam}$
 - $S8 = 9 \text{ kg/jam}$
 - $S9 = 10 \text{ kg/jam}$
 - $S10 = 11 \text{ kg/jam}$
 - $S11 = 12 \text{ kg/jam}$
 - $S12 = 13 \text{ kg/jam}$
 - $S13 = 14 \text{ kg/jam}$
 - $S14 = 15 \text{ kg/jam}$
 - $S15 = 16 \text{ kg/jam}$
 - $S16 = 17 \text{ kg/jam}$
 - $S17 = 18 \text{ kg/jam}$
 - $S18 = 19 \text{ kg/jam}$
 - $S19 = 20 \text{ kg/jam}$
 - $S20 = 21 \text{ kg/jam}$
 - $S21 = 22 \text{ kg/jam}$
 - $S22 = 23 \text{ kg/jam}$
 - $S23 = 24 \text{ kg/jam}$
 - $S24 = 25 \text{ kg/jam}$
 - $S25 = 26 \text{ kg/jam}$
 - $S26 = 27 \text{ kg/jam}$
 - $S27 = 28 \text{ kg/jam}$
 - $S28 = 29 \text{ kg/jam}$
 - $S29 = 30 \text{ kg/jam}$
 - $S30 = 31 \text{ kg/jam}$

Kajian pengaruh variabel penelitian terhadap parameter emisi, suhu pembakaran, dan destruction removal efficiency (DRE) dilakukan berdasarkan persamaan matematis, reaksi stoikiometri pembakaran, teori pembakaran, dan hasil penelitian terdahulu pada literatur.

Data dan ketentuan yang digunakan dalam analisa dan pembahasan berasal dari teori dan hasil penelitian terdahulu yang didapat dari mengkaji literatur terlebih dahulu. Berikut adalah persamaan dan analisa-analisa yang dilakukan untuk mencapai tujuan penelitian:

3.3.1 Perhitungan *Destruction Removal Efficiency* (DRE)

Pada penelitian ini nilai Destruction Removal Efficiency (DRE) dihitung dengan persamaan dasar DRE, yaitu:

$$DRE (\%) = \frac{W_{in} - W_{out}}{W_{in}} \times 100\% \quad \dots(1)$$

Dimana:

DRE (%) = *Destruction Removal Efficiency* dalam %

W_{in} = *Feeding rate* (kg/jam)

W_{out} = abu yang dihasilkan (kg/jam)

Persamaan ini digunakan untuk mengetahui efisiensi destruksi massa dari sampah yang dibakar.

3.3.2 Perhitungan Emisi yang Dihasilkan Berdasarkan Persamaan Desain Insinerator

Berdasarkan persamaan desain insinerator menurut John dan Swamy (2011), untuk mengestimasi emisi yang dihasilkan dari proses pembakaran pada insinerator komposisi sampah yang dibakar harus diketahui, lalu ditentukan beberapa asumsi, dan kemudian dihitung berdasarkan kesetimbangan persamaan reaksi pembakaran yang terjadi. Adapun langkah-langkahnya adalah sebagai berikut:

1. Asumsi

Asumsi ini berisi ketentuan dan nilai yang harus diketahui terlebih dahulu untuk mendukung perhitungan selanjutnya. Nilai-nilai yang tersebut adalah sebagai berikut:

- Komponen : *Polystyrene*
- Rumus Empiris : $(C_8H_8)_x$
- Berat Molekul : 104,1 gram/mol
- HHV : 40116 kJ/kg
- Suhu input sampah $32^\circ C$
- Terjadi pembakaran sempurna
- Udara mengandung 23% O_2 dan 77% N_2 (dalam berat)
- 0,02302 kg H_2O /kg udara kering pada kelembapan relatif 76% dan $32^\circ C$ dry bulb temperature
- Latent heat of vaporization dari air pada suhu $32^\circ C = 2425,1$ kJ/kg

Suhu input sampah dan relatif kelembapan disesuaikan dengan suhu dan kelembapan rata-rata Kota Surabaya.

2. Perhitungan input material

Komposisi sampah yang dibakar terdiri dari 100% *Polystyrene*. Dengan berat input sampah mengikuti variasi *feeding rate* yang telah ditentukan.

Total input *Polystyrene* $(C_8H_8)_x$:

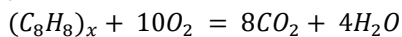
$$1 \quad x \text{ (variasi } feeding \text{ rate) kg/jam} = \dots \text{ kg/jam}$$

3. Input panas sampah

- Komponen : $(C_8H_8)_x$
- HHV : 40116 kJ/kg
- Input : $(variasi \ feeding \ rate) \text{ kg/jam}$
- Total heat : HHV x Input

4. Menentukan oksigen stoikiometri untuk pembakaran sampah

Total jumlah oksigen stoikiometri yang dibutuhkan dalam pemakaran ditentukan dengan kesetimbangan persamaan kimia berikut ini:



- Massa $(C_8H_8)_x = \text{variasi feeding rate}$
 - Berat molekul $(C_8H_8)_x = 104,1 \text{ gram/mol}$
 - Mol $(C_8H_8)_x = \text{Massa } (C_8H_8)_x \times \frac{1 \text{ mol } (C_8H_8)_x}{104,1 \text{ gram } (C_8H_8)_x}$
- Berdasarkan persamaan reaksi, untuk setiap satu mol $(C_8H_8)_x$ dibutuhkan 10 mol O_2
- Mol O_2 yang dibutuhkan = $\frac{10 \text{ mol } O_2}{1 \text{ mol } (C_8H_8)_x} \times \text{mol } (C_8H_8)_x$
 - Berat molekul $O_2 = 32 \text{ gram/mol}$
 - Berat O_2 yang dibutuhkan = $\frac{32 \text{ gram } O_2}{1 \text{ mol } O_2} \times \text{mol } O_2$

- Menentukan kebutuhan udara udara untuk setiap variasi *excess air* (%) yang telah ditentukan
 - Berat udara stoikiometri = $\frac{100}{23} \times \text{Berat } O_2$
 - Berat udara x% excess air = $\frac{(100+x)\%}{23} \times \text{berat udara stoikiometri}$
- Menghitung N_2 dan CO_2 yang dihasilkan dari proses pembakaran
 - Udara untuk pembakaran = Berat udara x% excess air
 - Excess air = Berat udara x% excess air – Berat udara stoikiometri
 - N_2 dari udara stoikiometri = $\frac{77}{100} \times \text{Berat udara stoikiometri}$
 - Total N_2 dan excess air = Excess air + N_2 dari udara stoikiometri
 - CO_2 yang dihasilkan dari pembakaran
 Berat molekul $CO_2 = 44,01 \text{ gram/mol}$
 Mol $CO_2 = \frac{8 \text{ mol } CO_2}{1 \text{ mol } (C_8H_8)_x} \times \text{mol } (C_8H_8)_x$
 Berat CO_2 dihasilkan = $\frac{44,01 \text{ gram } CO_2}{1 \text{ mol } CO_2} \times \text{mol } CO_2$

Dari perhitungan diatas akan didapatkan jumlah CO_2 , N_2 , dan *excess air* yang dihasilkan dari pembakaran sampah.

3.3.3 Perhitungan Suhu Pembakaran

Masih menggunakan persamaan desain insinerator, suhu pembakaran diketahui dengan menghitung *net balance* yaitu nilai yang menggambarkan jumlah panas yang berada dalam ruang bakar. Nilai tersebut kemudian dikonversi kedalam satuan suhu dengan persamaan desain insinerator menurut Nabizadeh, Afatar, dan Faraji (2016). Berikut adalah langkah-langkah perhitungannya:

1. Q_i = total heat input = HHV x *feeding rate*
2. Kehilangan panas radiasi
 $Radiation\ loss = 5\% \times total\ heat\ input$
3. Panas untuk abu
 $Heat\ to\ ash = mC_p dT$
Dengan
 m = berat abu
 C_p = kapasitas rata-rata abu = $0,831 \frac{kJ}{kg} \cdot ^\circ C$
 dT = perbedaan suhu
= suhu rancang ruang pembakaran – suhu input sampah
4. Panas untuk dry combustion product
 $Heat\ to\ dry\ combustion\ product = mC_p dT$
 m = berat total dry combustion product (CO_2 , N_2 , *excess air*)
 C_p = kapasitas rata-rata *dry products* = $1,086 \frac{kJ}{kg} \cdot ^\circ C$
 dT = perbedaan suhu
= suhu rancang ruang pembakaran – suhu input sampah
5. Panas untuk pembakaran kadar air
 $Heat\ to\ moisture = mC_p dT + mH_v$
 m = berat total H_2O
 C_p = kapasitas rata-rata H_2O = $2,347 \frac{kJ}{kg} \cdot ^\circ C$
 dT = perbedaan suhu
= suhu rancang ruang pembakaran – suhu input Sampah
 H_v = latent heat of vaporization = 2425,1 kJ/kg

6. Total panas yang keluar

$$\begin{aligned} \text{Total heat out } (Q_o) = & \text{radiation loss} + \\ & \text{heat to ash} + \\ & \text{heat to dry combustion product} + \\ & \text{heat to moisture} \end{aligned}$$

7. Panas yang dihasilkan

$$\text{Net heat balance} = (Q_i - Q_o) \text{ kJ/jam}$$

8. Suhu pembakaran

$$^{\circ}\text{F} = \frac{60 + (\text{net heat} \div 0,3)}{(1 + (1 + EA) \times (7,5 \times 10^{-4}) \times \text{net heat})}$$

$$^{\circ}\text{C} = (^{\circ}\text{F} - 32) \times \frac{5}{9}$$

3.4 Tahap Akhir

Pada tahap akhir ini dilakukan analisa terhadap data hasil penelitian yang kemudian dilakukan pengkajian dan pembahasan dengan konsiderasi dasaran-dasaran yang digunakan pada studi literatur. Kemudian dari hasil analisa dan pembahasan tersebut ditarik kesimpulan dan saran.

3.4.1 Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan dari penelitian ini nantinya berupa kesimpulan yang mencakup tujuan penelitian. Sedangkan saran berisi hal-hal apa saja yang bisa ditambahkan ataupun dilakukan untuk penyempurnaan penelitian dan juga untuk perkembangan penelitian selanjutnya.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

BAB 4

Hasil dan Pembahasan

4.1 Analisis Karakteristik Kimia Sampah *Polystyrene*

Analisis karakteristik kimia yang dilakukan meliputi *ultimate analysis*, *proximate analysis*, dan *heating value*. *Proximate analysis* dilakukan untuk mengetahui berat abu pada sampel sampah *Polystyrene* yang nantinya nilai ini digunakan untuk menentukan nilai *destruction removal efficiency* (DRE). Sedangkan *ultimate analysis* dilakukan untuk menentukan rumus kimia dari sampel sampah *Polystyrene* yang akan digunakan untuk mengetahui kesetimbangan reaksi pembakaran yang terjadi dan emisi gas yang dihasilkan. Untuk melakukan *ultimate* dan *proximate analysis*, maka dilakukan *moisture analysis* seperti dibawah ini untuk mengetahui berat basah dan berat kering dari sampah *Polystyrene*. Hasil perhitungan *moisture analysis* dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Moisture Analysis

Variasi Feeding Rate	Timbulan Sampah (Feeding rate), kg/jam	Moisture (%), [Khoirunnisa, Ashari, dan Setiani (2018)]	Berat Basah (kg)	Berat Kering (kg)
S1	2	5,39	0,108	1,892
S2	3		0,162	2,838
S3	4		0,216	3,784
S4	5		0,270	4,731
S5	6		0,323	5,677
S6	7		0,377	6,623
S7	8		0,431	7,569
S8	9		0,485	8,515
S9	10		0,539	9,461
S10	11		0,593	10,407
S11	12		0,647	11,353
S12	13		0,701	12,299

Variasi Feeding Rate	Timbulan Sampah (Feeding rate), kg/jam	Moisture (%), [Khoirunnisa, Ashari, dan Setiani (2018)]	Berat Basah (kg)	Berat Kering (kg)
S13	14	5,39	0,755	13,245
S14	15		0,809	14,192
S15	16		0,862	15,138
S16	17		0,916	16,084
S17	18		0,970	17,030
S18	19		1,024	17,976
S19	20		1,078	18,922
S20	21		1,132	19,868
S21	22		1,186	20,814
S22	23		1,240	21,760
S23	24		1,294	22,706
S24	25		1,348	23,653
S25	26		1,401	24,599
S26	27		1,455	25,545
S27	28		1,509	26,491
S28	29		1,563	27,437
S29	30		1,617	28,383
S30	31	1,671	29,329	

Nilai berat basah didapatkan dari perkalian timbulan sampah dan persen *moisture*. Sedangkan nilai berat kering didapatkan dari pengurangan timbulan sampah oleh berat basah. Perhitungan *ultimate* dan *proximate analysis* selanjutnya didasarkan pada berat kering sampah.

4.1.1 Proximate Analysis

Ketentuan persen *ash*, *volatile*, dan *fixed carbon content per dry weight basis* menggunakan ketentuan dalam literatur yang terlampir pada Tabel 4.2.

Tabel 4. 2 Karakteristik Kimia Plastik Polystyrene

Proximate Analysis*			Ultimate Anlysis						
A	V	FC	C**	H**	O**	N**	S**	Cl**	HHV***
%									(kJ/kg)
0,19	99,48	0,33	91,08	7,68	1,24	0,00	0,00	0,00	40116

*(Zhou et al., 2014)

** (Li et al., 2001)

*** (Zhang et al., 2011)

Selanjutnya untuk mengetahui berat dari *ash*, *volatile* dan *fixed carbon* adalah dengan mengalikan nilai persen masing-masing dengan berat kering tiap sampel. Hasil dari proximate analysis dilampirkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4. 3 Proximate Analysis

Variasi Feeding Rate	Berat Basah (kg)	Berat Kering (kg)	Percent by weight (dry basis), %*		
			Ash	Volatile	Fixed Carbon
<i>Polystyrene</i>			0,04%	99,57%	0,39 %
S9 (10 kg/jam)	0,539	9,461	0,004	9,4203	0,037
S4 (5 kg/jam)	0,2695	4,7305	0,002	4,7102	0,018
S14 (15 kg/jam)	0,8085	14,1915	0,006	14,13	0,055

*Zhou et al., 2014

4.1.2 Ultimate Analysis

Tabel 4. 4 Ultimate Analysis

Variasi Feeding Rate	Berat Basah (kg)	Berat Kering (kg)	Percent by weight (dry basis), %*					
			C	H	O	N	S	Cl
			90,37%	8,64%	0,9%	0%	0,09%	0%
S9 (10 kg/jam)	0,539	9,461	8,55	0,817	0,085	0	0,009	0
S4 (5 kg/jam)	0,270	4,7305	4,275	0,409	0,043	0	0,004	0
S14 (15 kg/jam)	0,809	14,1915	12,825	1,226	0,128	0	0,013	0

*Li et al., 2014

**Tabel 4. 5 Rumus Kimia Sampah Plastik
Polystyrene Variasi F1**

S9	C	H	O	N	S	Cl
Total elemen pada sampah (kg)	8,62	0,73	0,12	0,00	0,00	0,00
Berat atom (gram/mol)	12	1	16	14	32	35,5
Mol	718	727	7	0	0	0
Rumus Kimia (komposisi O dibuat 1)	98	99	1	0	0	0

**Tabel 4. 6 Rumus Kimia Sampah Plastik
Polystyrene Variasi F2**

S4	C	H	O	N	S	Cl
Total elemen pada sampah (kg)	4,31	0,36	0,06	0,00	0,00	0,00
Berat atom (gram/mol)	12	1	16	14	32	35,5
Mol	359	363	3,7	0	0	0
Rumus Kimia (komposisi S dibuat 1)	98	99	1	0	0	0

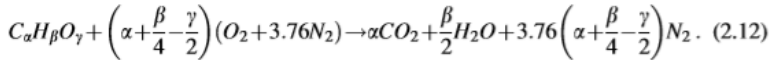
**Tabel 4. 7 Rumus Kimia Sampah Plastik
Polystyrene Variasi F3**

S14	C	H	O	N	S	Cl
Total elemen pada sampah (kg)	12,82	1,23	0,13	0,00	0,013	0,00
Berat atom (gram/mol)	12	1	16	14	32	35,5
Mol	1077	1090	11	0	0	0
Rumus Kimia (komposisi S dibuat 1)	98	99	1	0	0	0

Berdasarkan hasil proximate analysis yang terlampir pada Tabel 4.4 - Tabel 4.7 ketiga variasi sampah plastik *Polystyrene* memiliki komposisi mol karbon, hidrogen, mol oksigen, dan mol sulfur yang sama yaitu $C_{98}H_{99}O$.

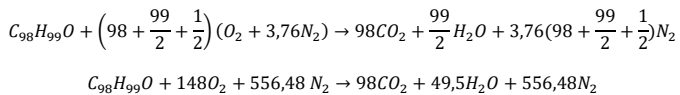
4.2 Stoikiometri Reaksi Pembakaran Sampah Plastik *Polystyrene*

Persamaan stoikiometri pembakaran pada dengan *theoretical air* (pembakaran dengan udara cukup) untuk pembakaran *single component*:

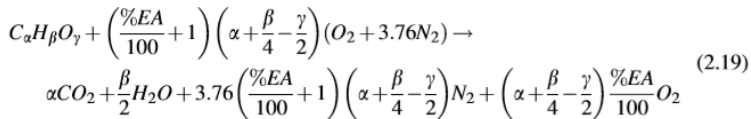


Maka stoikiometri pembakaran dengan kondisi udara yang cukup untuk sampah plastik *Polystyrene* pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Rumus kimia sampah: $C_{98}H_{99}O$



Sedangkan persamaan stoikiometri pembakaran dengan penambahan udara berlebih pada pembakaran *single component* ada sebagai berikut:



Dimana:

- %EA = %excess air

4.3 Pengaruh *Feeding Rate* terhadap nilai *Destruction Removal Efficiency (DRE)*

Dari hasil *proximate analysis* diketahui berat *ash content* untuk setiap variasi *feeding rate* yang telah ditentukan. *Ash content* tersebut adalah abu yang akan tertinggal pada proses pembakaran sampah plastik *Polystyrene*. Dengan menggunakan Persamaan 3.1 maka diperoleh nilai DRE untuk setiap variasi *feeding rate*.

$$DRE (\%) = \frac{W_{in} - W_{out}}{W_{in}} \times 100\% \quad \dots(1)$$

Dimana:

DRE (%) = *Destruction Removal Efficiency* dalam %

W_{in} = *Feeding rate* (kg/jam)

W_{out} = abu yang dihasilkan (kg/jam)

Sebelumnya diperlukan perhitungan untuk mengestimasi jumlah abu yang dihasilkan (W_{out}) pada setiap pembakarannya.

$$W_{out} = \text{Berat kering sampah} \times \% \text{ ash content}$$

Dimana:

$$\% \text{ ash content} = 0,19\%$$

Berikut adalah contoh perhitungan jumlah abu yang dihasilkan dan nilai DRE untuk variasi pembakaran S9, S4, dan S14.

1. Variasi *feeding rate* S9 (10 kg/jam)

$$\begin{aligned} W_{out} &= \text{Berat kering sampah} \times \% \text{ ash content} \\ &= 9,461 \text{ kg/jam} \times 0,19\% \\ &= 0,018 \text{ kg/jam} \end{aligned}$$

$$DRE (\%) = \frac{10\text{kg/jam} - 0,018\text{kg/jam}}{10\text{kg/jam}} \times 100\% = 99,96\%$$

2. Variasi feeding rate S4 (5 kg/jam)

$$\begin{aligned}W_{out} &= \text{Berat kering sampah} \times \% \text{ ash content} \\ &= 4,7035 \text{ kg/jam} \times 0,19\% \\ &= 0,009 \text{ kg/jam}\end{aligned}$$

$$\text{DRE (\%)} = \frac{5\text{kg/jam} - 0,009\text{kg/jam}}{5\text{kg/jam}} \times 100\% = 99,96\%$$

3. Variasi feeding rate S14 (15 kg/jam)

$$\begin{aligned}W_{out} &= \text{Berat kering sampah} \times \% \text{ ash content} \\ &= 14,1915 \text{ kg/jam} \times 0,19\% \\ &= 0,027 \text{ kg/jam}\end{aligned}$$

$$\text{DRE (\%)} = \frac{15\text{kg/jam} - 0,027\text{kg/jam}}{10\text{kg/jam}} \times 100\% = 99,96\%$$

Hasil perhitungan selengkapnya ditampilkan dalam Tabel 4.8 berikut ini.

Tabel 4. 8 Pengaruh Variasi *Feeding Rate* terhadap Nilai DRE

Komposisi Sampah	Win, Feeding rate (kg/jam)	*Moisture (%)	Berat Basah (kg)	Berat Kering (kg)	**Ash Content per dry weight basis (%)	Wout, abu yang dihasilkan (kg/jam)	Destruction Removal Efficiency (%)
<i>Polystyrene</i>	2	5,39	0,108	1,892	0,040	0,0008	99,9622
	3		0,162	2,838		0,0011	99,9622
	4		0,216	3,784		0,0015	99,9622
	5		0,270	4,731		0,0019	99,9622
	6		0,323	5,677		0,0023	99,9622
	7		0,377	6,623		0,0026	99,9622
	8		0,431	7,569		0,0030	99,9622
	9		0,485	8,515		0,0034	99,9622
	10		0,539	9,461		0,0038	99,9622
	11		0,593	10,407		0,0042	99,9622
	12		0,647	11,353		0,0045	99,9622
	13		0,701	12,299		0,0049	99,9622
	14		0,755	13,245		0,0053	99,9622
	15		0,809	14,192		0,0057	99,9622

Komposisi Sampah	Win, Feeding rate (kg/jam)	*Moisture (%)	Berat Basah (kg)	Berat Kering (kg)	**Ash Content per dry weight basis (%)	Wout, abu yang dihasilkan (kg/jam)	Destruction Removal Efficiency (%)
Polystyrene	16	5,39	0,8624	15,1376	0,040	0,0061	99,9622
	17		0,9163	16,0837		0,0064	99,9622
	18		0,9702	17,0298		0,0068	99,9622
	19		1,0241	17,9759		0,0072	99,9622
	20		1,078	18,922		0,0076	99,9622
	21		1,1319	19,8681		0,0079	99,9622
	22		1,1858	20,8142		0,0083	99,9622
	23		1,2397	21,7603		0,0087	99,9622
	24		1,2936	22,7064		0,0091	99,9622
	25		1,3475	23,6525		0,0095	99,9622
	26		1,4014	24,5986		0,0098	99,9622
	27		1,4553	25,5447		0,0102	99,9622
	28		1,5092	26,4908		0,0106	99,9622
	29		1,5631	27,4369		0,0110	99,9622
30	1,617	28,383	0,0114	99,9622			
31	1,6709	29,3291	0,0117	99,9622			

* Khoirunnisa, Ashari, dan Setiani 2018

**Zhou et al., 2014

Dari tabel diatas dapat dilihat untuk setiap variasi feeding rate yang berbeda menghasilkan berat abu yang berbeda pula. Akan tetapi hal ini tidak berpengaruh terhadap % *Destruction Removal Efficiency* (DRE). Insinerasi sampah plastik *Polystyrene* dengan feeding rate 10 kg/jam, 5 kg/jam, dan 15 kg/jam masing-masing memiliki nilai DRE yang sama yaitu sebesar 99,96%. Nilai DRE yang sangat tinggi ini menunjukkan hampir semua komponen plastik *Polystyrene* habis terbakar.

Tidak adanya perubahan pada nilai DRE ini diakibatkan sampah yang dibakar homogen yaitu hanya sampah plastik *polystyrene*. Sehingga perbandingan materi dari sampah yang

terkonversi menjadi abu tetap sama untuk setiap variasi *feeding rate*. Karena jenis sampah sama dan homogen maka fraksi *ash content* akan sama pada semua variasi *feeding rate*. Dalam *praktik* insinerasi kondisi seperti ini yang disarankan karena tingkat destruksi pada proses pembakaran bisa terprediksi dan terkontrol sesuai dengan desain yang kita tentukan.

4.4 Pengaruh Variasi Feeding Rate dan Excess Air terhadap Emisi yang Dihasilkan dengan Persamaan Desain Insinerator

Emisi yang dihitung pada penelitian ini mengacu pada produk yang dihasilkan oleh persamaan reaksi utama pembakaran *Polystyrene* dengan rumus empiris $(C_8H_8)_x$. Persamaan yang digunakan yaitu persamaan pada Sub-bab 3.4.2. Berikut ini adalah cara perhitungannya untuk sampah *Polystyrene* dengan variasi *feeding rate* 10 kg/jam dan *excess air* 25%.

1. Asumsi

- Komponen : *Polystyrene*
- Rumus Empiris : $(C_8H_8)_x$
- Berat Molekul : 104,1 gram/mol
- HHV : 40116 kJ/kg
- Suhu input sampah 32°C
- Terjadi pembakaran sempurna
- Udara mengandung 23% O₂ dan 77% N₂ (dalam berat)
- 0,02302 kg H₂O/kg udara kering pada kelembapan relatif 76% dan 32°C *dry bulb temperature*
- *Latent heat of vaporization* dari air pada suhu 32°C = 2425,1 kJ/kg

2. Perhitungan input material

Komposisi sampah yang dibakar terdiri dari 100% *Polystyrene*. Dengan berat input sampah yaitu 10 kg/jam.

Total input *Polystyrene* $(C_8H_8)_x$:

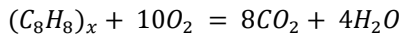
$$1 \times 10 \text{ kg/jam} = 10 \text{ kg/jam}$$

3. Input panas sampah

- Komponen : $(C_8H_8)_x$
- HHV : 40116 kJ/kg
- Input : 10 kg/jam
- Total heat : HHV x Input = 401160 kJ/jam

4. Menentukan oksigen stoikiometri untuk pembakaran sampah

Total jumlah oksigen stoikiometri yang dibutuhkan dalam pembakaran ditentukan dengan kesetimbangan persamaan kimia berikut ini:



- Massa $(C_8H_8)_x = 10$ kg
- Berat molekul $(C_8H_8)_x = 104,1$ gram/mol
- Mol $(C_8H_8)_x = 10$ kg x $\frac{1 \text{ mol } (C_8H_8)_x}{104,1 \text{ gram } (C_8H_8)_x}$
 $= 10.000 \text{ gram x } \frac{1 \text{ mol } (C_8H_8)_x}{104,1 \text{ gram } (C_8H_8)_x}$
 $\approx 96,1 \text{ mol } (C_8H_8)_x$
- Berdasarkan persamaan reaksi, untuk setiap satu mol $(C_8H_8)_x$ dibutuhkan 10 mol O_2
- Mol O_2 yang dibutuhkan = $\frac{10 \text{ mol } O_2}{1 \text{ mol } (C_8H_8)_x} \times 96,1 \text{ mol } (C_8H_8)_x$
 $= 961 \text{ mol}$
- Berat molekul $O_2 = 32$ gram/mol
- Berat O_2 yang dibutuhkan = $\frac{32 \text{ gram } O_2}{1 \text{ mol } O_2} \times 961 \text{ mol}$
 $= 30.752 \text{ gram } O_2$
 $= 30,752 \text{ kg } O_2$

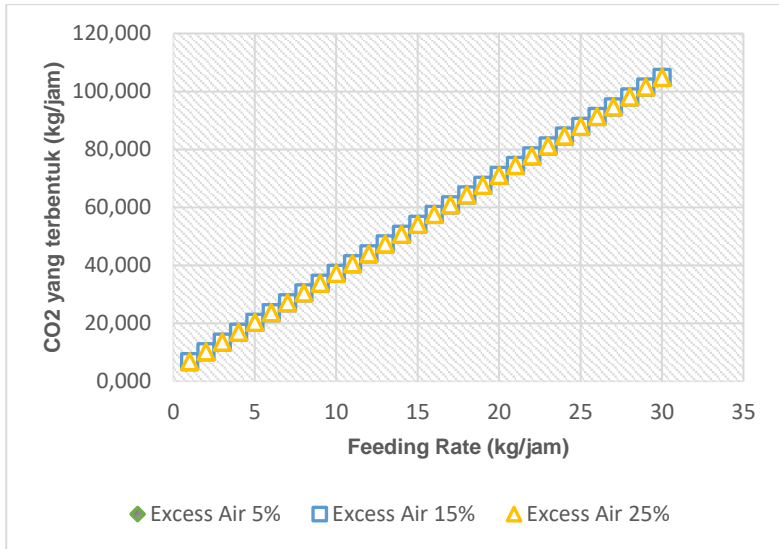
Jadi, berat oksigen yang dibutuhkan untuk membakar sampah dengan feeding rate 10 kg/jam yaitu sebanyak 30,752 kg O_2 /jam.

5. Menentukan udara untuk sampah dengan 125% excess air
- Berat udara stoikiometri = $\frac{100}{23} \times 30,752 \text{ kg/jam}$
 $\approx 133,71 \text{ kg/jam}$
 - Berat udara 125% excess air = $1,25 \times 133,71 \text{ kg/jam}$
 $\approx 167,14 \text{ kg/jam}$
6. Menghitung N₂ dan CO₂ yang dihasilkan dari proses pembakaran
- Udara untuk pembakaran (125%) = 167,14 kg/jam
 - Udara stoikiometri = 133,71 kg/jam
 - Excess air = 167,14 kg/jam - 133,71 kg/jam
 $= 33,43 \text{ kg/jam}$
 - N₂ dari udara stoikiometri = $\frac{77}{100} \times 133,71 \text{ kg/jam}$
 $\approx 102,96 \text{ kg/jam}$
 - Total N₂ dan excess air = 136,38 kg/jam
 - CO₂ yang dihasilkan dari pembakaran
 Berat molekul CO₂ = 44,01 gram/mol

$$\text{Mol CO}_2 = \frac{8 \text{ mol CO}_2}{1 \text{ mol (C}_8\text{H}_8)_x} \times 96,1 \text{ mol (C}_8\text{H}_8)_x$$

$$= 768,8 \text{ mol CO}_2$$
 Berat CO₂ dihasilkan = $\frac{44,01 \text{ gram CO}_2}{1 \text{ mol CO}_2} \times 768,8 \text{ mol CO}_2$
 $\approx 33.835 \text{ gram CO}_2$
 $= 33,835 \text{ kg CO}_2$
 CO₂ terbentuk dari pembakaran = 33,835 kg/jam

Hasil perhitungan untuk semua variasi *feeding rate* dan *excess air* kemudian ditampilkan pada Gambar 4.1 – 4.3.

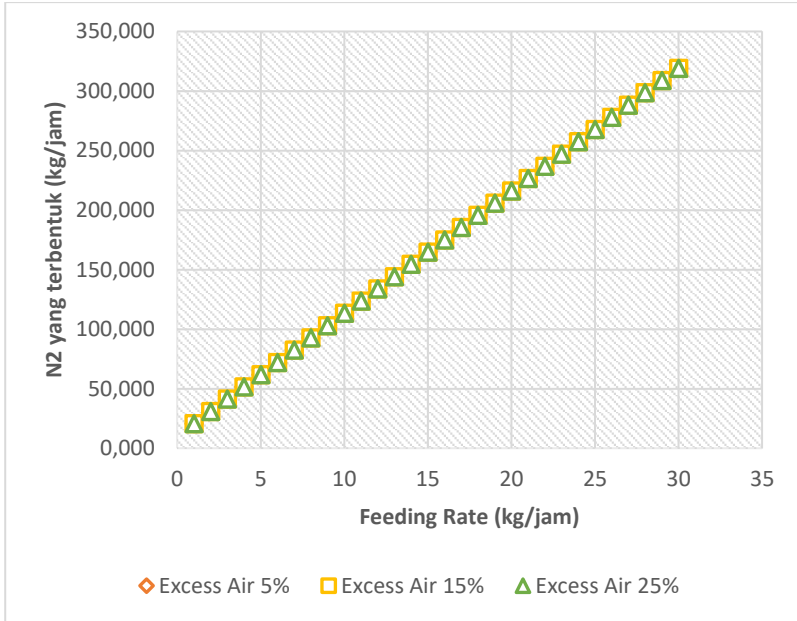


Gambar 4. 1 Pengaruh Variasi *Feeding Rate* dan *Excess Air* Terhadap CO₂ yang Dihasilkan

Pada Gambar 4.1 dapat dilihat bahwa feeding rate dan produksi CO₂ memiliki hubungan berbanding lurus. Terjadi peningkatan berat CO₂ yang dihasilkan dari proses pembakaran seiring dengan nilai variasi *feeding rate* yang bertambah. Dimana CO₂ paling tinggi dihasilkan pada feeding rate = 31 kg/jam dengan CO₂ yang dihasilkan sebesar 104,846 kg/jam. Sedangkan paling rendah dihasilkan pada feeding rate = 2 kg/jam dengan CO₂ yang dihasilkan sebesar 6,764 kg/jam. Peningkatan CO₂ yang beriringan dengan pertambahan nilai variasi *feeding rate* ini diakibatkan karena semakin banyaknya berat input sampah yang dibakar, materi yang dibakar pun semakin bertambah. Sehingga tersedia senyawa (C₈H₈)_x lebih banyak yang akan bereaksi dengan O₂ yang salah satu produk dari reaksi ini adalah CO₂. Begitu pula sebaliknya, semakin sedikit berat sampah yang dibakar, maka senyawa (C₈H₈)_x yang tersedia dalam reaksi pembakaran semakin sedikit pula.

Meningkatnya produksi CO_2 yang diakibatkan oleh peningkatan *feeding rate* juga terjadi pada penelitian yang dilakukan oleh Rizal dan Nurhayati (2017). Dimana mereka mengukur produksi CO, CO_2 , dan nilai DRE terhadap perubahan variasi *feeding rate*. Dengan nilai DRE yang didapatkan sama yaitu sebesar 99,99% pada setiap variasi *feeding rate*. Semakin meningkat *feeding rate*, produksi CO_2 semakin meningkat pula. Sedangkan untuk produksi CO menurun. Hal ini menunjukkan adanya peningkatan efisiensi pembakaran, karena menurunnya kadar CO berarti senyawa tersebut berhasil teroksidasi menjadi CO_2 .

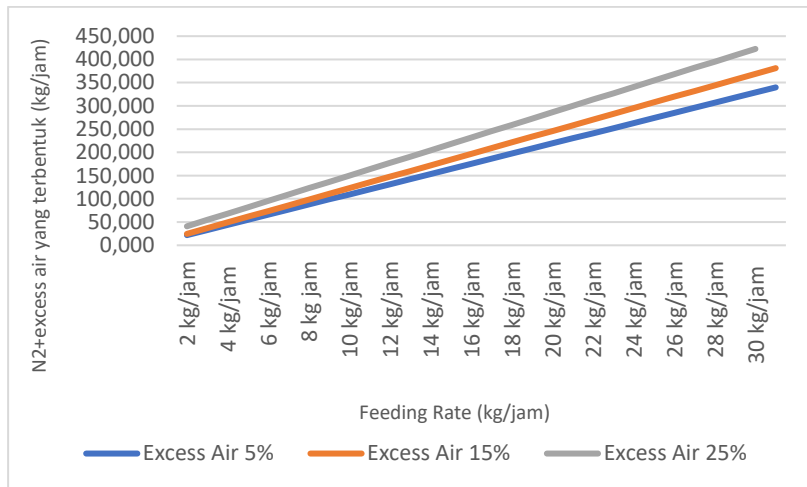
Tiga *series* yang mewakilkan *excess air* pada Gambar 4.1 terlihat saling berhimpitan. Hal ini dikarenakan jumlah CO_2 yang dihasilkan untuk variasi *excess air* 5%, 15%, dan variasi *excess air* 25% adalah sama. Maka dalam kondisi yang sama, CO_2 yang terbentuk dari reaksi pembakaran tidak dipengaruhi oleh penambahan udara berlebih.



Gambar 4. 2 Pengaruh Variasi Feeding Rate dan Excess Air terhadap N₂ yang Dihasilkan

Pada Gambar 4.2 juga terjadi peningkatan berat N₂ yang dihasilkan dari proses pembakaran yang beriringan dengan nilai variasi *feeding rate* yang bertambah. Produksi N₂ dihitung berdasarkan persentase molekul nitrogen yang terkandung dalam udara stoikiometri. Dalam hal ini bertambahnya *feeding rate* berarti bertambah pula senyawa (C₈H₈)_x yang akan dibakar. Yang mengakibatkan bertambah pula kebutuhan oksigen stoikiometri pada reaksi pembakaran. Dengan bertambahnya udah kebutuhan udara stoikiometri tentunya molekul nitrogen yang terkandung dalam udara bertambah pula. N₂ paling tinggi dihasilkan pada *feeding rate* = 31 kg/jam dengan jumlah sebesar 319,024 kg/jam. Sedangkan paling rendah dihasilkan pada *feeding rate* = 2kg/jam dengan N₂ yang dihasilkan sebesar 20,582 kg/jam.

Ketiga *series* yang mewakili excess air pada Gambar 4.2 juga terlihat saling berhimpitan. Hal ini dikarenakan berdasarkan persamaan John dan Swamy (2011), N_2 yang dihitung hanya berdasarkan udara stoikiometri, sedangkan suplai udara yang berlebih tetap dihitung sebagai *excess air* atau sebagai kelebihan udara.



Gambar 4. 3 Pengaruh Variasi Feeding Rate dan Excess Air terhadap N_2 yang Dihasilkan

Gambar 4.3 ditampilkan untuk menunjukkan adanya peningkatan jumlah udara berlebih yang tersisa. Udara berlebih yang tersisa ini diperlukan dalam pembakaran lanjutan untuk mereduksi senyawa-senyawa yang berbahaya dan memastikan proses pembakaran pada insinerator terjadi secara sempurna. Oleh karena itu dalam kegiatan insinerasi sangat disarankan untuk memiliki *secondary chamber* untuk pembakaran lanjutan dari senyawa-senyawa yang terdapat pada gas buang *primary combustion*.

Meskipun adanya udara berlebih ini mengakibatkan peningkatan kandungan oksigen, dimana peningkatan kandungan oksigen dapat meningkatkan terbentuknya nitrogen oksida (NO_x). Akan tetapi hal

ini bisa dikendalikan seiring menurunnya suhu akibat adanya udara berlebih ini juga yang akan kembali menurunkan emisi NO_x. Dalam *praktiknya*, jumlah excess air ini harus dikontrol agar tetap tersedia sejumlah udara untuk mereduksi senyawa berbahaya tetapi juga tetapi bisa mereduksi emisi NO_x.

Hasil perhitungan selengkapnya terdapat pada lampiran.

4.5 Pengaruh Variasi Feeding Rate dan Excess Air terhadap Suhu Pembakaran

Estimasi suhu pembakaran dilakukan dengan pendekatan konversi panas yang terbentuk dari reaksi pembakaran ke satuan Celsius. Maka dibutuhkan perhitungan untuk mengetahui *net balance* dari panas yang dihasilkan yang menggambarkan jumlah panas yang berada dalam ruang bakar. Berikut merupakan contoh perhitungan *heat net balance* untuk variasi *feeding rate* 10 kg/jam dan *excess air* 25%.

1. $Q_i = \text{total heat} = 401.160 \text{ kJ/jam}$

2. Kehilangan panas radiasi

$$\text{Radiation loss} = 5\% \times \text{total heat input}$$

$$\text{Radiation loss} = 5\% \times 401160 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} = 20.058 \text{ kJ/h}$$

3. Panas untuk abu

$$\text{Heat to ash} = mC_p dT$$

$$\text{Heat to ash} = 0,00378 \frac{\text{kg}}{\text{jam}} \times 0,831 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot ^\circ\text{C} \times 1068^\circ\text{C}$$

$$\text{Heat to ash} \approx 3,355 \text{ kJ/jam}$$

4. Panas untuk dry combustion product

$$\text{Heat to dry}$$

$$\text{combustion product} = mC_p dT$$

$$= 170,145 \frac{\text{kg}}{\text{jam}} \times 1,086 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot ^\circ\text{C} \times 1068^\circ\text{C}$$

$$\approx 197.342 \text{ kJ/jam}$$

5. Panas untuk pembakaran kadar air

$$\text{Heat to moisture} = mC_p dT + mHv$$

$$= \left(8,346 \frac{\text{kg}}{\text{jam}} \times 2,347 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot ^\circ\text{C} \times 1068^\circ\text{C} \right) + \left(8,346 \frac{\text{kg}}{\text{jam}} \times 2425,1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$$

$$\approx 41.160 \frac{\text{kJ}}{\text{jam}}$$

6. Total panas yang keluar

$$\begin{aligned} \text{Total heat out } (Q_o) &= \text{radiation loss} + \\ &\quad \text{heat to ash} + \\ &\quad \text{heat to dry combustion product} + \\ &\quad \text{heat to moisture} \\ &\approx 258.563 \text{ kJ/jam} \end{aligned}$$

7. Panas yang dihasilkan

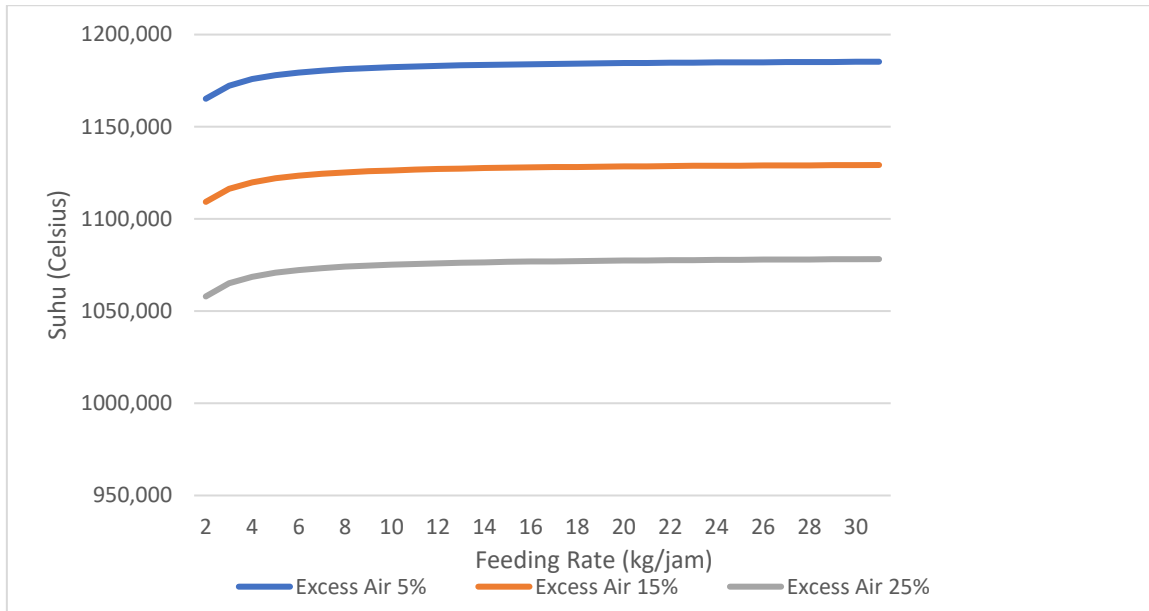
$$\begin{aligned} \text{Net Balance} &= Q_i - Q_o \\ &= 401.160 \text{ kJ/jam} - 258.563 \text{ kJ/jam} \\ &= 142.597 \text{ kJ/jam} \end{aligned}$$

8. Suhu Pembakaran

$$^\circ\text{F} = \frac{60 + (142.597 \div 0,3)}{[1 + (1 + 1,25) \times (7,5 \times 10^{-4}) \times (142.597)]} = 1967,382$$

$$^\circ\text{C} = (1967,383 - 32) \times \frac{5}{9} = 1075,212$$

Hasil perhitungan untuk semua variasi *feeding rate* dan *excess air* kemudian ditampilkan dengan grafik pada Gambar 4.4 berikut ini.



Gambar 4. 4 Pengaruh Variasi Feeding Rate dan Excess Air terhadap Suhu Pembakaran

Semakin besar nilai *feeding rate* maka kalor dalam sampah akan semakin besar pula. Adapun dalam persamaan desain insinerator yang digunakan hal ini ditampilkan dengan total heat input yaitu kalor yang ada pada sampah. Dengan menggunakan pendekatan konversi panas ke satuan Celsius penambahan panas yang dihasilkan ini tentunya mengakibatkan peningkatan suhu pembakaran. Dari Gambar 4.4 dapat dilihat bahwa peningkatan suhu pembakaran terjadi seiring meningkatnya pula nilai *feeding rate*.

Sedangkan dengan *excess air*, suhu pembakaran memiliki hubungan yang berbanding terbalik. Berdasarkan Gambar 4.4 grafik *excess air* 25% berada diposisi paling bawah dan grafik *excess air* 15% berada dibawah grafik *excess air* 5%.

Suhu pembakaran paling tinggi dicapai pada saat nilai *feeding rate* paling besar yaitu 31 kg/jam dan *excess air* paling rendah yaitu 5%. Dimana pada kondisi tersebut proses pembakaran menghasilkan suhu sebesar 1185,271 derajat celsius.

Apabila ditinjau dari hasil perhitungan pada variasi *feeding rate* 10 kg/jam dan *excess air* 25% diatas, nilai *heat net balance* diatas bernilai positif dan cukup tinggi yaitu sebesar 142.597 kJ/jam. Secara teori, nilai *heat net balance* yang positif menggambarkan tidak terjadinya *heat deficiency* atau kekurangan panas/energi. Sehingga secara teoritis pembakaran tersebut tidak memerlukan bahan bakar tambahan. Dengan kondisi tersebut juga memperlihatkan bahwa sampah plastik *polystyrene* ini memiliki potensi untuk dijadikan sebagai bahan bakar insinerasi sampah yang memiliki nilai kalor rendah.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

BAB 5 PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang bisa diambil dari penjabaran hasil dan pembahasan penelitian adalah sebagai berikut:

1. Variasi *feeding rate* dari 2kg/jam hingga 31 kg/jam yang tidak mengakibatkan perbedaan pada nilai DRE yang dihasilkan. Setiap variasi *feeding rate* menghasilkan nilai DRE yang sama yaitu sebesar 99,96%. *Feeding rate* 2 kg/jam menghasilkan CO₂ sebanyak 6,764 kg/jam dan N₂ sebanyak 20,582 kg/jam. Sedangkan untuk suhu pembakaran sebesar 1165,186 celsius pada penambahan *excess air* 5%, 1109,254 celsius pada penambahan *excess air* 15%, dan 1057,956 pada penambahan *excess air* 25%. *Feeding rate* 31 kg/jam menghasilkan CO₂ sebanyak 104,846 kg/jam dan N₂ sebanyak 319,024 kg/jam. Untuk suhu pembakaran yaitu sebesar 1185,271 celsius pada penambahan *excess air* 5%, 1129,251 celsius pada penambahan *excess air* 15%, dan 1078,191 celsius pada penambahan *excess air* 25%. Dari hasil tersebut bisa dilihat terjadi peningkatan suhu ± 20 derajat Celsius, peningkatan produksi CO₂ sekitar sebesar ± 98 kg/jam, dan peningkatan produksi N₂ sebesar ± 298 kg/jam.
2. Pada penambahan *excess air* 5%, 15%, dan 25% emisi CO₂ yang dihasilkan sama yaitu sebesar 6,764 kg CO₂/jam dengan *feeding rate* 2 kg/jam dan 104,846 kg CO₂ /jam dengan *feeding rate* 31 kg/jam. Begitu pula untuk emisi N₂ pada penambahan *excess air* 5%, 15%, dan 25% nilainya sama yaitu 20,582 kg N₂/jam dengan *feeding rate* 2 kg/jam dan 319,024 kg N₂/jam dengan *feeding rate* 31 kg/jam. Tidak ada kenaikan maupun penurunan dalam emisi CO₂ dan N₂ yang dihasilkan pada penambahan *excess air* 5%, 15%, dan penambahan *excess air* 25%. Sedangkan untuk parameter suhu pembakaran (pada *feeding rate* 2 kg/jam) penambahan *excess air* 5% menghasilkan suhu sebesar 1165,186 celsius, penambahan *excess air* 15%

menghasilkan suhu sebesar 1109,254 celsius, dan penambahan *excess air* 25% menghasilkan suhu sebesar 1057,956 celsius. Dari nilai-nilai tersebut dapat dilihat terjadi penurunan suhu pembakaran seiring pertambahan % penambahan *excess air*. Dengan penurunan suhu ± 53 derajat celsius.

3. Emisi CO₂ dan N₂ paling rendah dihasilkan pada feeding rate 2 kg/jam pada semua variasi *excess air*. Suhu pembakaran paling tinggi dihasilkan pada feeding rate 31kg/jam dengan variasi *excess air* 5%. Sedangkan untuk nilai DRE sama untuk semua variasi *feeding rate*. Apabila disesuaikan dengan desain insinerator yang berada di Departemen Teknik Lingkungan ITS, maka kondisi yang dipilih yaitu feeding rate 2kg/jam dengan penambahan *excess air* 15%. Pada kondisi ini suhu yang dihasilkan sebesar 1109,254 celsius yang paling mendekati dengan suhu operasi maksimum ruang pembakaran utama Insinerator Departemen Teknik Lingkungan ITS sebesar 1100 celsius. Serta pada kondisi ini juga menghasilkan emisi yang paling rendah.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan dari penelitian kajian pembakaran sampah pada insinerator melalui simulasi persamaan matematis ini adalah sebagai berikut:

1. Perlu adanya variasi feeding rate dan komposisi sampah yang lebih beragam untuk bisa mengetahui lebih jauh pengaruh feeding rate terhadap *Destruction Removal Efficiency* (DRE).
2. Disarankan untuk menggunakan metode lain yang bisa langsung mendapatkan nilai suhu pembakaran dalam satuan temperatur.
3. Sebaiknya penelitian selanjutnya juga melakukan obeservasi dan pengukuran dengan praktik pembakaran sampah secara langsung pada insinerator. Agar kondisi optimum yang terpilih bisa mempertimbangakn lebih banyak lagi faktor operasi dan sesuai dengan kondisi dan desain Insinerator Departemen Teknik Lingkungan ITS.

Penelitian selanjutnya bisa dikembangkan dengan melihat potensi *energy recovery* dan memanfaatkan insinerator untuk menjadi teknologi *waste to energy*.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmabhi. 2017. **HIPS, GPPS, EPS – Understanding Polystyrene**,
<URL:
<https://ahmabhi.wordpress.com/2017/08/04/hips-gpps-eps-understanding-Polystyrene/>
- Auburn University. 2020. **The Combustion Process**,
<URL:
http://www.auburn.edu/academic/forestry_wildlife/fire/combustion.htm
- Basel Convention. 1997. **Technical Guidelines on Incineration on Land**. Secretariat of the Basel Convention International Environment House, Switzerland.
- Environment Agency. 2009. **The Incineration of Waste (EPR 5.01)**. Environment Agency, Bristol.
- Environmental Protection Agency (EPA). 1998. **On-site Incineration**. Environmental Protection Agency, United States..
- Government of Canada. 2017. **Technical Document for Batch Waste Incineration**,
<URL: <https://www.ec.gc.ca/gdd-mw/default.asp?lang=En&n=8A09EA04-1>
- Green Garage. 2016. **8 Pros and Cons of Incineration**,
<URL: <https://greengarageblog.org/8-pros-and-cons-of-incineration>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2006. **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. IPCC.

- John Shiju Easo, Swamy C. Nanjunda. 2011. "*Design of Incinerator for The Treatment of Bio-medical Solid Waste in Chikmagalur City*". **Journal of Industrial Pollution Control**, pp. 173-179.
- Khoirunnisa Rosida, Moch.Luqman Ashari, Vivin Setiani. 2018. "Pengukuran Timbulan, Densitas, Komposisi, dan Kadar Air Limbah Padat Non-B3 di PPNS". **Conference Proceeding on Waste Treatment Technology**, pp. 71-76.
- Metro.co.uk. 2018. **Can you recycle Polystyrene? Here's what you should do with it**,
 <URL: <https://metro.co.uk/2018/04/18/can-recycle-Polystyrene-7478185/>
- Mitchell D. Erickson, Paul G. Gorman, Daniel T. Heggem. 1985. "Relationship of Destruction Parameters to the Destruction/Removal Efficiency of PCBs". **Journal of the Air Pollution Control Association**, 35:6,663-665.
- Nabizadeh Ramin, Atafar Zahra, Faraji Maryam. 2016. "Speadsheet Model to Design of Hazardous Waste Incinerators". **Journal of Air Pollution and Health**, 1:(4), 269-280
- Naryono, E. et al. 2015. "Simulasi dan Evaluasi Insinerasi Sampah Organik Rumah Tangga pada Reaktor Unggun Tetap (Fixed Bed)". **Indonesian Green Technology Journal**, pp. 28-35.
- National Research Council. 2000. **Waste Incineration and Public Health**. National Academy Press, Washington DC.

Nidoni Pooja G. Des.2017. Incineration Process for Solid Waste Management and Effective Utilization of By Products. **International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET) 4**, 12:378-382.

PLANNING AND IMPLEMENTATION OF INTEGRATED SOLID WASTE MANAGEMENT STRATEGIES AT LOCAL LEVEL: THE CASE OF SURABAYA CITY. Centre Collaborating with UNEP on Environmental Technologies (CCET), 2017.

PREP Program – *Polystyrene* New Report Alert. **Nexant Chem Systems Products Report.**

Quina Margarida J., Quinta-Ferreira Rosa M., Bordado Joao C.M. 2011. **Air Pollution Control in Municipal Solid Waste Incinerators.** Instituto Superior Tecnico, Portugal.

Sam Aravind dan Barik Debabrata. 2019. **Energy from Toxic Organic Waste for Heat and Power Generation.** Elsevier Ltd., India.

Sugar Engineers. 2019. **Psychometric Calculation**, <URL:<https://www.sugartech.co.za/psychro/index.php>>
Tchobanoglous, G., Theisen, H., dan Vigil, S.A. 1993. **Integrated Solid Waste Management. Engineering Principles and Management Issues.** McGraw Hill International Editions, New York.

Thaariq Jabbar. 2019. Kajian Pembakaran Low Emission dan Low Energy pada Sistem Insinerasi Sampah Plastik Unuseable [tesis]. Surabaya(ID): Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

The Guardian. 2019. **'Plastic recycling is a myth': what really happens to your rubbish?**,

<URL:<https://www.theguardian.com/environment/2019/aug/17/plastic-recycling-myth-what-really-happens-your-rubbish>

Vallero Daniel A. 2011. **Waste : A Handbook for Management.**

Elsevier Inc., North Carolina.

Wark K., Warner G., Davis W. 1998. **Air Pollution: Its Original and Control (3rd ed.)**. Addison Wesley Longman, Inc.

Yuliani Manis. Des.2016. "Insinerasi untuk Pengolahan Sampah Kota". **JRL**, 9:89-96

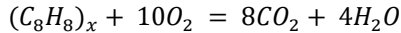
Zhou, et al. 2014. "Classification and Comparison of Municipal Solid Waste based on Thermochemical Characteristics". **Journal of The Air & Waste Management Association**, pp. 597-616.

LAMPIRAN

LAMPIRAN

I. Perhitungan Berat Oksigen Stoikiometri berdasarkan Kesetimbangan Mol

Contoh perhitungan untuk feeding rate 10 kg/jam:



- Massa $(C_8H_8)_x = 10$ kg
- Berat molekul $(C_8H_8)_x = 104,1$ gram/mol
- Mol $(C_8H_8)_x = 10 \text{ kg} \times \frac{1 \text{ mol } (C_8H_8)_x}{104,1 \text{ gram } (C_8H_8)_x}$
 $= 10.000 \text{ gram} \times \frac{1 \text{ mol } (C_8H_8)_x}{104,1 \text{ gram } (C_8H_8)_x}$
 $\approx 96,1 \text{ mol } (C_8H_8)_x$
- Berdasarkan persamaan reaksi, untuk setiap satu mol $(C_8H_8)_x$ dibutuhkan 10 mol O_2
- Mol O_2 yang dibutuhkan = $\frac{10 \text{ mol } O_2}{1 \text{ mol } (C_8H_8)_x} \times 96,1 \text{ mol } (C_8H_8)_x$
 $= 961 \text{ mol}$
- Berat molekul $O_2 = 32$ gram/mol
- Berat O_2 yang dibutuhkan = $\frac{32 \text{ gram } O_2}{1 \text{ mol } O_2} \times 961 \text{ mol}$
 $= 30.752 \text{ gram } O_2$
 $= 30,752 \text{ kg } O_2$

Tabel I. 1 Berat Oksigen Stoikiometri

Feeding Rate 2kg/jam		
Mol PS	19,2123	mol (C ₈ H ₈) _x
Mol Oksigen	192,123	mol O ₂
Berat Oksigen stoikiometri	6147,935	gram O ₂
	6,147935	kg O ₂
Feeding Rate 3kg/jam		
Mol PS	28,81844	mol (C ₈ H ₈) _x
Mol Oksigen	288,1844	mol O ₂
Berat Oksigen stoikiometri	9221,902	gram O ₂
	9,221902	kg O ₂
Feeding Rate 4kg/jam		
Mol PS	38,42459	mol (C ₈ H ₈) _x
Mol Oksigen	384,2459	mol O ₂
Berat Oksigen stoikiometri	12295,87	gram O ₂
	12,29587	kg O ₂
Feeding Rate 5kg/jam		
Mol PS	48,03074	mol (C ₈ H ₈) _x
Mol Oksigen	480,3074	mol O ₂
Berat Oksigen stoikiometri	15369,84	gram O ₂
	15,36984	kg O ₂
Feeding Rate 6kg/jam		
Mol PS	57,63689	mol (C ₈ H ₈) _x
Mol Oksigen	576,3689	mol O ₂
Berat Oksigen stoikiometri	18443,8	gram O ₂
	18,4438	kg O ₂

Feeding Rate 7kg/jam		
Mol PS	67,24304	mol (C ₈ H ₈) _x
Mol Oksigen	672,4304	mol O ₂
Berat Oksigen stoikiometri	21517,77	gram O ₂
	21,51777	kg O ₂
Feeding Rate 8kg/jam		
Mol PS	76,84918	mol (C ₈ H ₈) _x
Mol Oksigen	768,4918	mol O ₂
Berat Oksigen stoikiometri	24591,74	gram O ₂
	24,59174	kg O ₂
Feeding Rate 9kg/jam		
Mol PS	86,45533	mol (C ₈ H ₈) _x
Mol Oksigen	864,5533	mol O ₂
Berat Oksigen stoikiometri	27665,71	gram O ₂
	27,66571	kg O ₂
Feeding Rate 10kg/jam		
Mol PS	96,06148	mol (C ₈ H ₈) _x
Mol Oksigen	960,6148	mol O ₂
Berat Oksigen stoikiometri	30739,67	gram O ₂
	30,73967	kg O ₂
Feeding Rate 11kg/jam		
Mol PS	105,6676	mol (C ₈ H ₈) _x
Mol Oksigen	1056,676	mol O ₂
Berat Oksigen stoikiometri	33813,64	gram O ₂
	33,81364	kg O ₂

Feeding Rate 12kg/jam		
Mol PS	115,2737752	mol (C ₈ H ₈) _x
Mol Oksigen	1152,737752	mol O ₂
Berat Oksigen stoikiometri	36887,60807	gram O ₂
	36,88760807	kg O ₂
Feeding Rate 13kg/jam		
Mol PS	124,8799232	mol (C ₈ H ₈) _x
Mol Oksigen	1248,799232	mol O ₂
Berat Oksigen stoikiometri	39961,57541	gram O ₂
	39,96157541	kg O ₂
Feeding Rate 14kg/jam		
Mol PS	134,4860711	mol (C ₈ H ₈) _x
Mol Oksigen	1344,860711	mol O ₂
Berat Oksigen stoikiometri	43035,54275	gram O ₂
	43,03554275	kg O ₂
Feeding Rate 15kg/jam		
Mol PS	144,092219	mol (C ₈ H ₈) _x
Mol Oksigen	1440,92219	mol O ₂
Berat Oksigen stoikiometri	46109,51009	gram O ₂
	46,10951009	kg O ₂
Feeding Rate 16kg/jam		
Mol PS	153,698367	mol (C ₈ H ₈) _x
Mol Oksigen	1536,98367	mol O ₂
Berat Oksigen stoikiometri	49183,47743	gram O ₂
	49,18347743	kg O ₂

Feeding Rate 17kg/jam		
Mol PS	163,3045149	mol (C ₈ H ₈) _x
Mol Oksigen	1633,045149	mol O ₂
Berat Oksigen stoikiometri	52257,44476	gram O ₂
	52,25744476	kg O ₂
Feeding Rate 18kg/jam		
Mol PS	172,9106628	mol (C ₈ H ₈) _x
Mol Oksigen	1729,106628	mol O ₂
Berat Oksigen stoikiometri	55331,4121	gram O ₂
	55,3314121	kg O ₂
Feeding Rate 19kg/jam		
Mol PS	182,5168108	mol (C ₈ H ₈) _x
Mol Oksigen	1825,168108	mol O ₂
Berat Oksigen stoikiometri	58405,37944	gram O ₂
	58,40537944	kg O ₂
Feeding Rate 20kg/jam		
Mol PS	192,1229587	mol (C ₈ H ₈) _x
Mol Oksigen	1921,229587	mol O ₂
Berat Oksigen stoikiometri	61479,34678	gram O ₂
	61,47934678	kg O ₂
Feeding Rate 21kg/jam		
Mol PS	201,7291066	mol (C ₈ H ₈) _x
Mol Oksigen	2017,291066	mol O ₂
Berat Oksigen stoikiometri	64553,31412	gram O ₂
	64,55331412	kg O ₂

Feeding Rate 17kg/jam		
Mol PS	163,3045149	mol (C ₈ H ₈) _x
Mol Oksigen	1633,045149	mol O ₂
Berat Oksigen stoikiometri	52257,44476	gram O ₂
	52,25744476	kg O ₂
Feeding Rate 18kg/jam		
Mol PS	172,9106628	mol (C ₈ H ₈) _x
Mol Oksigen	1729,106628	mol O ₂
Berat Oksigen stoikiometri	55331,4121	gram O ₂
	55,3314121	kg O ₂
Feeding Rate 19kg/jam		
Mol PS	182,5168108	mol (C ₈ H ₈) _x
Mol Oksigen	1825,168108	mol O ₂
Berat Oksigen stoikiometri	58405,37944	gram O ₂
	58,40537944	kg O ₂
Feeding Rate 20kg/jam		
Mol PS	192,1229587	mol (C ₈ H ₈) _x
Mol Oksigen	1921,229587	mol O ₂
Berat Oksigen stoikiometri	61479,34678	gram O ₂
	61,47934678	kg O ₂
Feeding Rate 21kg/jam		
Mol PS	201,7291066	mol (C ₈ H ₈) _x
Mol Oksigen	2017,291066	mol O ₂
Berat Oksigen stoikiometri	64553,31412	gram O ₂
	64,55331412	kg O ₂

Feeding Rate 22kg/jam		
Mol PS	211,3352546	mol (C ₈ H ₈) _x
Mol Oksigen	2113,352546	mol O ₂
Berat Oksigen stoikiometri	67627,28146	gram O ₂
	67,62728146	kg O ₂
Feeding Rate 23kg/jam		
Mol PS	220,9414025	mol (C ₈ H ₈) _x
Mol Oksigen	2209,414025	mol O ₂
Berat Oksigen stoikiometri	70701,2488	gram O ₂
	70,7012488	kg O ₂
Feeding Rate 24kg/jam		
Mol PS	230,5475504	mol (C ₈ H ₈) _x
Mol Oksigen	2305,475504	mol O ₂
Berat Oksigen stoikiometri	73775,21614	gram O ₂
	73,77521614	kg O ₂
Feeding Rate 25kg/jam		
Mol PS	240,1536984	mol (C ₈ H ₈) _x
Mol Oksigen	2401,536984	mol O ₂
Berat Oksigen stoikiometri	76849,18348	gram O ₂
	76,84918348	kg O ₂
Feeding Rate 26kg/jam		
Mol PS	249,7598463	mol (C ₈ H ₈) _x
Mol Oksigen	2497,598463	mol O ₂
Berat Oksigen stoikiometri	79923,15082	gram O ₂
	79,92315082	kg O ₂

Feeding Rate 27kg/jam		
Mol PS	259,3659942	mol (C ₈ H ₈) _x
Mol Oksigen	2593,659942	mol O ₂
Berat Oksigen stoikiometri	82997,11816	gram O ₂
	82,99711816	kg O ₂
Feeding Rate 28kg/jam		
Mol PS	268,9721422	mol (C ₈ H ₈) _x
Mol Oksigen	2689,721422	mol O ₂
Berat Oksigen stoikiometri	86071,08549	gram O ₂
	86,07108549	kg O ₂
Feeding Rate 29kg/jam		
Mol PS	278,5782901	mol (C ₈ H ₈) _x
Mol Oksigen	2785,782901	mol O ₂
Berat Oksigen stoikiometri	89145,05283	gram O ₂
	89,14505283	kg O ₂
Feeding Rate 30kg/jam		
Mol PS	288,184438	mol (C ₈ H ₈) _x
Mol Oksigen	2881,84438	mol O ₂
Berat Oksigen stoikiometri	92219,02017	gram O ₂
	92,21902017	kg O ₂
Feeding Rate 31kg/jam		
Mol PS	297,790586	mol (C ₈ H ₈) _x
Mol Oksigen	2977,90586	mol O ₂
Berat Oksigen stoikiometri	95292,98751	gram O ₂
	95,29298751	kg O ₂

II. Perhitungan *Total Heat Input*

Contoh perhitungan untuk *feeding rate* 10kg/jam

$$\begin{aligned} \text{Total heat} &= \text{HHV} \times \text{Input} \\ &= 40116 \text{ kJ/kg} \times 10\text{kg/jam} \\ &= 401160 \text{ kJ/jam} \end{aligned}$$

Tabel II. 1 Total Heat Input

Komponen	HHV (kJ/kg)	Feeding Rate Input (kg/h)	Total Heat Input (kJ/h)
(C ₈ H ₈) _x	40116	2	80232
		3	120348
		4	160464
		5	200580
		6	240696
		7	280812
		8	320928
		9	361044
		10	401160
		11	441276
		12	481392
		13	521508
		14	561624
		15	601740
		16	641856
		17	681972
		18	722088
		19	762204
		20	802320
		21	842436
22	882552		
23	922668		

Komponen	HHV (kj/kg)	Feeding Rate Input (kg/h)	Total Heat Input (kj/h)
$(C_8H_8)_x$	40116	24	962784
		25	1002900
		26	1043016
		27	1083132
		28	1123248
		29	1163364
		30	1203480
		31	1243596

III. Perhitungan *Total Moisture*

Contoh Perhitungan untuk feeding rate 10kg/jam dan excess air 25%:

- H_2O pada sampah = kadar air x berat sampah
 = 5,39% x 10 kg/jam
 = 0,539 kg/jam
- H_2O dari reaksi pembakaran = $\left(\frac{10 \text{ mol } H_2O}{1 \text{ mol } (C_8H_8)_x} \times 96,1 \text{ mol } (C_8H_8)_x \right) \times 18,015 \text{ gram/mol } H_2O$
 = 6922 gram
 = 6,922 kg
- H_2O dari udara pembakaran = $(1,25 \times 30,73967) \text{ kg/jam} \times 0,02302 \text{ kg } H_2O/\text{kg udara}$
 = 0,855 kg/jam
- Total moisture = $(0,539 + 6,922 + 0,855) \text{ kg/jam}$
 = 8,346 kg/jam

Tabel III. 1 Total Moisture untuk Excess Air 5%

No.	Variasi Feeding Rate (kg/jam)	Excess Air 5%			
		H ₂ O pada sampah	H ₂ O dari reaksi pembakaran	H ₂ O dari udara pembakaran	Total moisture
		(kg/jam)			
1.	2	0,1078	1,384	0,163	1,655
2.	3	0,1617	2,077	0,223	2,461
3.	4	0,2156	2,769	0,297	3,282
4.	5	0,2695	3,461	0,372	4,102
5.	6	0,3234	4,153	0,446	4,923
6.	7	0,3773	4,846	0,520	5,743
7.	8	0,4312	5,538	0,594	6,563
8.	9	0,4851	6,230	0,669	7,384
9.	10	0,539	6,922	0,743	8,204
10.	11	0,5929	7,614	0,817	9,025
11.	12	0,6468	8,307	0,892	9,845
12.	13	0,7007	8,999	0,966	10,665
13.	14	0,7546	9,691	1,040	11,486
14.	15	0,8085	10,383	1,115	12,306
15.	16	0,8624	11,076	1,189	13,127
16.	17	0,9163	11,768	1,263	13,947
17.	18	0,9702	12,460	1,337	14,768
18.	19	1,0241	13,152	1,412	15,588
19.	20	1,078	13,844	1,486	16,408
20.	21	1,1319	14,537	1,560	17,229

No.	Variasi Feeding Rate (kg/jam)	Excess Air 5%			
		H ₂ O pada sampah	H ₂ O dari reaksi pembakaran	H ₂ O dari udara pembakaran	Total moisture
		(kg/jam)			
21.	22	1,1858	15,22881844	1,63461902	18,04923746
22.	23	1,2397	15,92103746	1,70891988	18,86965735
23.	24	1,2936	16,61325648	1,78322075	19,69007723
24.	25	1,3475	17,3054755	1,85752161	20,51049712
25.	26	1,4014	17,99769452	1,93182248	21,330917
26.	27	1,4553	18,68991354	2,00612334	22,15133689
27.	28	1,5092	19,38213256	2,08042421	22,97175677
28.	29	1,5631	20,07435159	2,15472507	23,79217666
29.	30	1,617	20,76657061	2,22902594	24,61259654
30.	31	1,6709	21,45878963	2,3033268	25,43301643

Tabel III. 2 Total Moisture untuk Excess Air 15%

No.	Variasi Feeding Rate (kg/jam)	Excess Air 15%			
		H ₂ O pada sampah	H ₂ O dari reaksi pembakaran	H ₂ O dari udara pembakaran	Total moisture
		(kg/jam)			
1.	2	0,1078	1,38443804	0,16275427	1,654992315
2.	3	0,1617	2,076657061	0,24413141	2,482488473
3.	4	0,2156	2,768876081	0,32550855	3,30998463
4.	5	0,2695	3,461095101	0,40688569	4,137480788
5.	6	0,3234	4,153314121	0,48826282	4,964976945
6.	7	0,3773	4,845533141	0,56963996	5,792473103

No.	Variasi Feeding Rate (kg/jam)	Excess Air 15%			
		H ₂ O pada sampah	H ₂ O dari reaksi pembakaran	H ₂ O dari udara pembakaran	Total moisture
		(kg/jam)			
7.	8	0,4312	5,537752161	0,6510171	6,61996926
8.	9	0,4851	6,229971182	0,73239424	7,447465418
9.	10	0,539	6,922190202	0,81377137	8,274961575
10.	11	0,5929	7,614409222	0,89514851	9,102457733
11.	12	0,6468	8,306628242	0,97652565	9,92995389
12.	13	0,7007	8,998847262	1,05790279	10,75745005
13.	14	0,7546	9,691066282	1,13927992	11,58494621
14.	15	0,8085	10,3832853	1,22065706	12,41244236
15.	16	0,8624	11,07550432	1,3020342	13,23993852
16.	17	0,9163	11,76772334	1,38341134	14,06743468
17.	18	0,9702	12,45994236	1,46478847	14,89493084
18.	19	1,0241	13,15216138	1,54616561	15,72242699
19.	20	1,078	13,8443804	1,62754275	16,54992315
20.	21	1,1319	14,53659942	1,70891988	17,37741931
21.	22	1,1858	15,22881844	1,79029702	18,20491547
22.	23	1,2397	15,92103746	1,87167416	19,03241162
23.	24	1,2936	16,61325648	1,9530513	19,85990778
24.	25	1,3475	17,3054755	2,03442843	20,68740394
25.	26	1,4014	17,99769452	2,11580557	21,5149001
26.	27	1,4553	18,68991354	2,19718271	22,34239625
27.	28	1,5092	19,38213256	2,27855985	23,16989241
28.	29	1,5631	20,07435159	2,35993698	23,99738857
29.	30	1,617	20,76657061	2,44131412	24,82488473
30.	31	1,6709	21,45878963	2,52269126	25,65238088

Tabel III. 3 Total Moisture untuk Excess Air 25%

No.	Variasi Feeding Rate (kg/jam)	Excess Air 25%			
		H ₂ O pada sampah	H ₂ O dari reaksi pembakaran	H ₂ O dari udara pembakaran	Total moisture
		(kg/jam)			
1.	2	0,1078	1,38443804	0,17690682	1,669144861
2.	3	0,1617	2,076657061	0,26536023	2,503717291
3.	4	0,2156	2,768876081	0,35381364	3,338289721
4.	5	0,2695	3,461095101	0,44226705	4,172862152
5.	6	0,3234	4,153314121	0,53072046	5,007434582
6.	7	0,3773	4,845533141	0,61917387	5,842007012
7.	8	0,4312	5,537752161	0,70762728	6,676579443
8.	9	0,4851	6,229971182	0,79608069	7,511151873
9.	10	0,539	6,922190202	0,8845341	8,345724304
10.	11	0,5929	7,614409222	0,97298751	9,180296734
11.	12	0,6468	8,306628242	1,06144092	10,01486916
12.	13	0,7007	8,998847262	1,14989433	10,84944159
13.	14	0,7546	9,691066282	1,23834774	11,68401402
14.	15	0,8085	10,3832853	1,32680115	12,51858646
15.	16	0,8624	11,07550432	1,41525456	13,35315889
16.	17	0,9163	11,76772334	1,50370797	14,18773132
17.	18	0,9702	12,45994236	1,59216138	15,02230375
18.	19	1,0241	13,15216138	1,68061479	15,85687618
19.	20	1,078	13,8443804	1,7690682	16,69144861
20.	21	1,1319	14,53659942	1,85752161	17,52602104

No.	Variasi Feeding Rate (kg/jam)	Excess Air 25%			
		H ₂ O pada sampah	H ₂ O dari reaksi pembakaran	H ₂ O dari udara pembakaran	Total moisture
		(kg/jam)			
21.	22	1,1858	15,22881844	1,94597502	18,36059347
22.	23	1,2397	15,92103746	2,03442843	19,1951659
23.	24	1,2936	16,61325648	2,12288184	20,02973833
24.	25	1,3475	17,3054755	2,21133525	20,86431076
25.	26	1,4014	17,99769452	2,29978866	21,69888319
26.	27	1,4553	18,68991354	2,38824207	22,53345562
27.	28	1,5092	19,38213256	2,47669549	23,36802805
28.	29	1,5631	20,07435159	2,5651489	24,20260048
29.	30	1,617	20,76657061	2,65360231	25,03717291
30.	31	1,6709	21,45878963	2,74205572	25,87174534

IV. Hasil Perhitungan CO₂, N₂, dan Excess Air yang Terbentuk

Tabel IV. 1 CO₂, N₂, dan Excess Air yang Terbentuk pada Penambahan Excess Air 5%

No.	Variasi Feeding Rate	Excess Air 5%		
		CO ₂	N ₂	N ₂ + excess air
		(kg/jam)		
1.	2 kg/jam	6,764	20,582	21,919
2.	3 kg/jam	10,146	30,873	32,878
3.	4 kg/jam	13,529	41,164	43,837
4.	5 kg/jam	16,911	51,456	54,797
5.	6 kg/jam	20,293	61,747	65,756
6.	7 kg/jam	23,675	72,038	76,716
7.	8 kg jam	27,057	82,329	87,675
8.	9 kg/jam	30,439	92,620	98,634
9.	10 kg/jam	33,821	102,911	109,594
10.	11 kg/jam	37,203	113,202	120,553
11.	12 kg/jam	40,586	123,493	131,512
12.	13 kg/jam	43,968	133,784	142,472
13.	14 kg/jam	47,350	144,076	153,431
14.	15 kg/jam	50,732	154,367	164,390
15.	16 kg/jam	54,114	164,658	175,350
16.	17 kg/jam	57,496	174,949	186,309
17.	18 kg/jam	60,878	185,240	197,269
18.	19 kg/jam	64,261	195,531	208,228
19.	20 kg/jam	67,643	205,822	219,187
20.	21 kg/jam	71,025	216,113	230,147

No.	Variasi Feeding Rate	Excess Air 5%		
		CO ₂	N ₂	N ₂ + excess air
		(kg/jam)		
21.	22 kg/jam	74,407	226,404	241,106
22.	23 kg/jam	77,789	236,695	252,065
23.	24 kg/jam	81,171	246,987	263,025
24.	25 kg/jam	84,553	257,278	273,984
25.	26 kg/jam	87,935	267,569	284,943
26.	27 kg/jam	91,318	277,860	295,903
27.	28 kg/jam	94,700	288,151	306,862
28.	29 kg/jam	98,082	298,442	317,821
29.	30 kg/jam	101,464	308,733	328,781
30.	31 kg/jam	104,846	319,024	339,740

Tabel IV. 2 CO₂, N₂, dan Excess Air yang Terbentuk pada Penambahan Excess Air 15%

No.	Variasi Feeding Rate	Excess Air 15%		
		CO ₂	N ₂	N ₂ + excess air
		(kg/jam)		
1.	2 kg/jam	6,764	20,582	24,592
2.	3 kg/jam	10,146	30,873	36,888
3.	4 kg/jam	13,529	41,164	49,183
4.	5 kg/jam	16,911	51,456	61,479
5.	6 kg/jam	20,293	61,747	73,775
6.	7 kg/jam	23,675	72,038	86,071
7.	8 kg/jam	27,057	82,329	98,367

No.	Variasi Feeding Rate	Excess Air 15%		
		CO ₂	N ₂	N ₂ + excess air
		(kg/jam)		
8.	9 kg/jam	30,439	92,620	110,663
9.	10 kg/jam	33,821	102,911	122,959
10.	11 kg/jam	37,203	113,202	135,255
11.	12 kg/jam	40,586	123,493	147,550
12.	13 kg/jam	43,968	133,784	159,846
13.	14 kg/jam	47,350	144,076	172,142
14.	15 kg/jam	50,732	154,367	184,438
15.	16 kg/jam	54,114	164,658	196,734
16.	17 kg/jam	57,496	174,949	209,030
17.	18 kg/jam	60,878	185,240	221,326
18.	19 kg/jam	64,261	195,531	233,622
19.	20 kg/jam	67,643	205,822	245,917
20.	21 kg/jam	71,025	216,113	258,213
21.	22 kg/jam	74,407	226,404	270,509
22.	23 kg/jam	77,789	236,695	282,805
23.	24 kg/jam	81,171	246,987	295,101
24.	25 kg/jam	84,553	257,278	307,397
25.	26 kg/jam	87,935	267,569	319,693
26.	27 kg/jam	91,318	277,860	331,988
27.	28 kg/jam	94,700	288,151	344,284
28.	29 kg/jam	98,082	298,442	356,580
29.	30 kg/jam	101,464	308,733	368,876
30.	31 kg/jam	104,846	319,024	381,172

Tabel IV. 3 CO₂, N₂, dan Excess Air yang Terbentuk pada Penambahan Excess Air 25%

No.	Variasi Feeding Rate	Excess Air 25%		
		CO ₂	N ₂	N ₂ + excess air
		(kg/jam)		
1.	2 kg/jam	6,764	20,582	27,265
2.	3 kg/jam	10,146	30,873	40,897
3.	4 kg/jam	13,529	41,164	54,530
4.	5 kg/jam	16,911	51,456	68,162
5.	6 kg/jam	20,293	61,747	81,794
6.	7 kg/jam	23,675	72,038	95,427
7.	8 kg jam	27,057	82,329	109,059
8.	9 kg/jam	30,439	92,620	122,691
9.	10 kg/jam	33,821	102,911	136,324
10.	11 kg/jam	37,203	113,202	149,956
11.	12 kg/jam	40,586	123,493	163,589
12.	13 kg/jam	43,968	133,784	177,221
13.	14 kg/jam	47,350	144,076	190,853
14.	15 kg/jam	50,732	154,367	204,486
15.	16 kg/jam	54,114	164,658	218,118
16.	17 kg/jam	57,496	174,949	231,750
17.	18 kg/jam	60,878	185,240	245,383
18.	19 kg/jam	64,261	195,531	259,015
19.	20 kg/jam	67,643	205,822	272,648
20.	21 kg/jam	71,025	216,113	286,280

No.	Variasi Feeding Rate	Excess Air 25%		
		CO ₂	N ₂	N ₂ + excess air
		(kg/jam)		
21.	22 kg/jam	74,407	226,404	299,912
22.	23 kg/jam	77,789	236,695	313,545
23.	24 kg/jam	81,171	246,987	327,177
24.	25 kg/jam	84,553	257,278	340,809
25.	26 kg/jam	87,935	267,569	354,442
26.	27 kg/jam	91,318	277,860	368,074
27.	28 kg/jam	94,700	288,151	381,707
28.	29 kg/jam	98,082	298,442	395,339
29.	30 kg/jam	101,464	308,733	408,971
30.	31 kg/jam	104,846	319,024	422,604

V. Hasil Perhitungan Suhu Pembakaran

Tabel V. 1 Suhu Pembakaran pada Semua Variasi *Feeding Rate* dan *Excess Air 5%*

N o.	Variasi Feeding Rate	Excess Air 5%							
		Radiation loss	Heat to Ash	Heat to Dry Combustion Product	Heat to moisture	Total heat out	Net Heat	Suhu	
	kg/jam	(kJ/jam)					F	C	
1.	2	4011,6	0,672	33267,91	8161,92	45442,10	34789,90	212,933	116,519
2.	3	6017,4	1,008	49901,86	12138,18	68058,45	52289,55	214,212	117,229
3.	4	8023,2	1,343	66535,81	16184,25	90744,60	69719,40	214,854	117,585
4.	5	10029,0	1,679	83169,77	20230,31	113430,75	87149,25	215,241	117,800
5.	6	12034,8	2,015	99803,72	24276,37	136116,91	104579,09	215,499	117,944
6.	7	14040,6	2,351	116437,68	28322,43	158803,06	122008,94	215,684	118,047
7.	8	16046,4	2,687	133071,63	32368,49	181489,21	139438,79	215,823	118,124
8.	9	18052,2	3,023	149705,58	36414,55	204175,36	156868,64	215,932	118,184
9.	10	20058,0	3,359	166339,54	40460,61	226861,51	174298,49	216,018	118,232
10.	11	22063,8	3,695	182973,49	44506,68	249547,66	191728,34	216,089	118,272
11.	12	24069,6	4,030	199607,44	48552,74	272233,81	209158,19	216,149	118,305

No.	Variasi Feeding Rate	Excess Air 5%							
		Radiation loss	Heat to Ash	Heat to Dry Combustion Product	Heat to moisture	Total heat out	Net Heat	Suhu	
	kg/jam	(kj/jam)						F	C
1		2607	4,	21624	5259	29491	22658	216	118
2.	13	5,4	37	1,40	8,80	9,96	8,04	1,99	3,33
1		2808	4,	23287	5664	31760	24401	216	118
3.	14	1,2	70	5,35	4,86	6,11	7,89	2,42	3,57
1		3008	5,	24950	6069	34029	26144	216	118
4.	15	7,0	04	9,30	0,92	2,26	7,74	2,79	3,77
1		3209	5,	26614	6473	36297	27887	216	118
5.	16	2,8	37	3,26	6,98	8,41	7,59	3,12	3,95
1		3409	5,	28277	6878	38566	29630	216	118
6.	17	8,6	71	7,21	3,04	4,57	7,43	3,40	4,11
1		3610	6,	29941	7282	40835	31373	216	118
7.	18	4,4	05	1,16	9,11	0,72	7,28	3,66	4,26
1		3811	6,	31604	7687	43103	33116	216	118
8.	19	0,2	38	5,12	5,17	6,87	7,13	3,89	4,38
1		4011	6,	33267	8092	45372	34859	216	118
9.	20	6,0	72	9,07	1,23	3,02	6,98	4,10	4,50
2		4212	7,	34931	8496	47640	36602	216	118
0.	21	1,8	05	3,03	7,29	9,17	6,83	4,28	4,60
2		4412	7,	36594	8901	49909	38345	216	118
1.	22	7,6	39	6,98	3,35	5,32	6,68	4,45	4,70
2		4613	7,	38258	9305	52178	40088	216	118
2.	23	3,4	72	0,93	9,41	1,47	6,53	4,61	4,78

No.	Variasi Feeding Rate	Excess Air 5%							
		Radiation loss	Heat to Ash	Heat to Dry Combustion Product	Heat to moisture	Total heat out	Net Heat	Suhu	
	kg/jam	(kj/jam)						F	C
23.	24	4813 9,2	8,0 6	39921 4,89	97105 ,48	54446 7,62	41831 6,38	216 4,75	118 4,86
24.	25	5014 5,0	8,4 0	41584 8,84	10115 1,54	56715 3,77	43574 6,23	216 4,88	118 4,93
25.	26	5215 0,8	8,7 3	43248 2,79	10519 7,60	58983 9,92	45317 6,08	216 5,00	118 5,00
26.	27	5415 6,6	9,0 7	44911 6,75	10924 3,66	61252 6,07	47060 5,93	216 5,11	118 5,06
27.	28	5616 2,4	9,4 0	46575 0,70	11328 9,72	63521 2,23	48803 5,77	216 5,22	118 5,12
28.	29	5816 8,2	9,7 4	48238 4,65	11733 5,78	65789 8,38	50546 5,62	216 5,31	118 5,17
29.	30	6017 4,0	10, 08	49901 8,61	12138 1,84	68058 4,53	52289 5,47	216 5,40	118 5,22
30.	31	6217 9,8	10, 41	51565 2,56	12542 7,91	70327 0,68	54032 5,32	216 5,49	118 5,27

Tabel V. 2 Suhu Pembakaran pada Semua Variasi Feeding Rate dan Excess Air 15%

No.	Variasi Feeding Rate	Excess Air 15%							
		Radiation loss	Heat to Ash	Heat to Dry Combustion Product	Heat to moisture	Total heat out	Net Heat	Suhu	
	kg/jam	(kj/jam)						F	C
1.	2	4011,60	0,67	36368,20	8161,92	48542,39	31689,61	202,8,66	110,9,25
2.	3	6017,40	1,01	54552,30	1224,2,88	72813,58	47534,42	204,1,33	111,6,30
3.	4	8023,20	1,34	72736,40	1632,3,84	97084,78	63379,22	204,7,73	111,9,85
4.	5	10029,00	1,68	90920,50	2040,4,80	12135,5,97	79224,03	205,1,59	112,2,00
5.	6	12034,80	2,02	109104,60	2448,5,76	14562,7,17	95068,83	205,4,18	112,3,43
6.	7	14040,60	2,35	127288,69	2856,6,72	16989,8,36	11091,3,64	205,6,02	112,4,46
7.	8	16046,40	2,69	145472,79	3264,7,68	19416,9,56	12675,8,44	205,7,41	112,5,23
8.	9	18052,20	3,02	163656,89	3672,8,64	21844,0,75	14260,3,25	205,8,49	112,5,83
9.	10	20058,00	3,36	181840,99	4080,9,59	24271,1,95	15844,8,05	205,9,36	112,6,31
10.	11	22063,80	3,69	200025,09	4489,0,55	26698,3,14	17429,2,86	206,0,07	112,6,70
11.	12	24069,60	4,03	218209,19	4897,1,51	29125,4,33	19013,7,67	206,0,66	112,7,03

No.	Variasi Feeding Rate	Excess Air 15%							
		Radiation loss	Heat to Ash	Heat to Dry Combustion Product	Heat to moisture	Total heat out	Net Heat	Suhu	
	kg/jam	(kj/jam)						F	C
12.	13	2607 5,40	4, 37	23639 3,29	5305 2,47	31552 5,53	20598 2,47	206 1,16	112 7,31
13.	14	2808 1,20	4, 70	25457 7,39	5713 3,43	33979 6,72	22182 7,28	206 1,59	112 7,55
14.	15	3008 7,00	5, 04	27276 1,49	6121 4,39	36406 7,92	23767 2,08	206 1,96	112 7,76
15.	16	3209 2,80	5, 37	29094 5,59	6529 5,35	38833 9,11	25351 6,89	206 2,29	112 7,94
16.	17	3409 8,60	5, 71	30912 9,69	6937 6,31	41261 0,31	26936 1,69	206 2,57	112 8,10
17.	18	3610 4,40	6, 05	32731 3,79	7345 7,27	43688 1,50	28520 6,50	206 2,83	112 8,24
18.	19	3811 0,20	6, 38	34549 7,88	7753 8,23	46115 2,70	30105 1,30	206 3,06	112 8,37
19.	20	4011 6,00	6, 72	36368 1,98	8161 9,19	48542 3,89	31689 6,11	206 3,26	112 8,48
20.	21	4212 1,80	7, 05	38186 6,08	8570 0,15	50969 5,09	33274 0,91	206 3,45	112 8,58
21.	22	4412 7,60	7, 39	40005 0,18	8978 1,11	53396 6,28	34858 5,72	206 3,62	112 8,68
22.	23	4613 3,40	7, 72	41823 4,28	9386 2,07	55823 7,47	36443 0,53	206 3,77	112 8,76

No.	Variasi Feeding Rate	Excess Air 15%							
		Radiation loss	Heat to Ash	Heat to Dry Combustion Product	Heat to moisture	Total heat out	Net Heat	Suhu	
	kg/jam	(kj/jam)						F	C
23.	24	4813 9,20	8,0 6	43641 8,38	97943 ,03	58250 8,67	38027 5,33	206 3,92	112 8,84
24.	25	5014 5,00	8,4 0	45460 2,48	10202 3,99	60677 9,86	39612 0,14	206 4,05	112 8,91
25.	26	5215 0,80	8,7 3	47278 6,58	10610 4,95	63105 1,06	41196 4,94	206 4,17	112 8,98
26.	27	5415 6,60	9,0 7	49097 0,68	11018 5,91	65532 2,25	42780 9,75	206 4,28	112 9,04
27.	28	5616 2,40	9,4 0	50915 4,78	11426 6,87	67959 3,45	44365 4,55	206 4,38	112 9,10
28.	29	5816 8,20	9,7 4	52733 8,88	11834 7,83	70386 4,64	45949 9,36	206 4,48	112 9,15
29.	30	6017 4,00	10, 08	54552 2,98	12242 8,78	72813 5,84	47534 4,16	206 4,57	112 9,20
30.	31	6217 9,80	10, 41	56370 7,07	12650 9,74	75240 7,03	49118 8,97	206 4,65	112 9,25

Tabel V. 3 Suhu Pembakaran pada Semua Variasi Feeding Rate dan Excess Air 25%

N o.	Variasi Feeding Rate	Excess Air 25%							
		Radiation loss	Heat to Ash	Heat to Dry Combustion Product	Heat to moisture	Total heat out	Net Heat	Suhu	
	kg/jam	(kj/jam)						F	C
1.	2	4011,60	0,67	39468,49	8231,72	51712,48	28519,52	193,632	105,796
2.	3	6017,40	1,01	59202,73	1234,757	77568,71	42779,29	194,914	106,508
3.	4	8023,20	1,34	78936,98	1646,343	10342,495	57039,05	195,561	106,867
4.	5	1002,900	1,68	98671,22	2057,929	12928,119	71298,81	195,952	107,084
5.	6	1203,480	2,02	11840,547	2469,515	15513,743	85558,57	196,213	107,230
6.	7	1404,060	2,35	13813,971	2881,100	18099,367	99818,33	196,401	107,334
7.	8	1604,640	2,69	15787,396	3292,686	20684,991	11407,809	196,541	107,412
8.	9	1805,220	3,02	17760,820	3704,272	23270,614	12833,786	196,651	107,473
9.	10	2005,800	3,36	19734,245	4115,858	25856,238	14259,762	196,738	107,521
10.	11	2206,380	3,69	21707,669	4527,443	28441,862	15685,738	196,810	107,561
11.	12	2406,960	4,03	23681,094	4939,029	31027,486	17111,714	196,870	107,594

No.	Variasi Feeding Rate	Excess Air 25%							
		Radiation loss	Heat to Ash	Heat to Dry Combustion Product	Heat to moisture	Total heat out	Net Heat	Suhu	
	kg/jam	(kj/jam)						F	C
1		2607	4,	25654	5350	33613	18537	196	107
2.	13	5,40	37	5,18	6,15	1,10	6,90	9,21	6,23
1		2808	4,	27627	5762	36198	19963	196	107
3.	14	1,20	70	9,43	2,01	7,33	6,67	9,64	6,47
1		3008	5,	29601	6173	38784	21389	197	107
4.	15	7,00	04	3,67	7,86	3,57	6,43	0,02	6,68
1		3209	5,	31574	6585	41369	22815	197	107
5.	16	2,80	37	7,92	3,72	9,81	6,19	0,35	6,86
1		3409	5,	33548	6996	43955	24241	197	107
6.	17	8,60	71	2,16	9,58	6,05	5,95	0,64	7,02
1		3610	6,	35521	7408	46541	25667	197	107
7.	18	4,40	05	6,41	5,44	2,29	5,71	0,90	7,16
1		3811	6,	37495	7820	49126	27093	197	107
8.	19	0,20	38	0,65	1,29	8,52	5,48	1,13	7,29
1		4011	6,	39468	8231	51712	28519	197	107
9.	20	6,00	72	4,90	7,15	4,76	5,24	1,34	7,41
2		4212	7,	41441	8643	54298	29945	197	107
0.	21	1,80	05	9,14	3,01	1,00	5,00	1,53	7,51
2		4412	7,	43415	9054	56883	31371	197	107
1.	22	7,60	39	3,38	8,87	7,24	4,76	1,70	7,61
2		4613	7,	45388	9466	59469	32797	197	107
2.	23	3,40	72	7,63	4,72	3,48	4,52	1,85	7,70

No.	Variasi Feeding Rate	Excess Air 25%							
		Radiation loss	Heat to Ash	Heat to Dry Combustion Product	Heat to moisture	Total heat out	Net Heat	Suhu	
	kg/jam	(kj/jam)						F	C
23.	24	4813 9,20	8,0 6	47362 1,87	98780 ,58	62054 9,72	34223 4,28	197 2,00	107 7,78
24.	25	5014 5,00	8,4 0	49335 6,12	10289 6,44	64640 5,95	35649 4,05	197 2,13	107 7,85
25.	26	5215 0,80	8,7 3	51309 0,36	10701 2,30	67226 2,19	37075 3,81	197 2,25	107 7,92
26.	27	5415 6,60	9,0 7	53282 4,61	11112 8,15	69811 8,43	38501 3,57	197 2,37	107 7,98
27.	28	5616 2,40	9,4 0	55255 8,85	11524 4,01	72397 4,67	39927 3,33	197 2,47	107 8,04
28.	29	5816 8,20	9,7 4	57229 3,10	11935 9,87	74983 0,91	41353 3,09	197 2,57	107 8,09
29.	30	6017 4,00	10, 08	59202 7,34	12347 5,73	77568 7,14	42779 2,86	197 2,66	107 8,14
30.	31	6217 9,80	10, 41	61176 1,59	12759 1,58	80154 3,38	44205 2,62	197 2,74	107 8,19

BIOGRAFI PENULIS

BIOGRAFI PENULIS



Penulis adalah mahasiswa kelahiran Kota Bandung pada Juli 1998. Penulis telah menempuh pendidikan dasar pada tahun 2004-2010 di SDN Cibadak III. Kemudian dilanjutkan dengan Pendidikan menengah di SMP Negeri 2 Bandung pada tahun 2010-2013 dan pendidikan tingkat atas di SMA Negeri 8 Bandung dari tahun 2013-2016. Penulis mengambil pendidikan S1 di Departemen Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil Perencanaan dan Kebumihan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Surabaya pada tahun 2016, terdaftar dengan NRP. 03211640000039.

Selama perkuliahan penulis aktif di Himpunan Mahasiswa Teknik Lingkungan (HMTL) sebagai Ketua Komunitas EEEEC. Selain berorganisasi penulis tergabung dengan divisi konten ITS Website Team dan mengikuti salah satu *global project* dengan Kumamoto University. Penulis juga mengikuti beberapa pelatihan manajerial, pelatihan manajemen *wordpress based website*, pelatihan *Search Engine Optimization* (SEO), dan pelatihan yang berkaitan dengan ilmu teknik lingkungan dalam rangka pengembangan diri. Penulis dapat dihubungi via email asrianisayuliawati@gmail.com.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

**LEMBAR ASISTENSI
DAN FORMULIR PERBAIKAN**



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

FORM FTA-04

FORMULIR PERBAIKAN LAPORAN TUGAS AKHIR

Nama : Asri Anisa Yuliawati
NRP : 03211640000039
Judul Tugas Akhir : Kajian Pembakaran Plastik
Polystyrene (PS) terhadap Emisi,
Suhu Pembakaran, dan Destruction
Removal Efficiency (DRE) pada
Insinerator

No	Saran Perbaikan	Tanggapan/Perbaikan
1.	Abstrak dinyatakan dengan kuantitatif, perubahan sebesar apa? Satuan spesifiknya bagaimana?	Mencantumkan nilai hasil perhitungan beserta satuannya pada abstrak
2.	Margin didaftar isi, daftar gambar, daftar tabel diraikan	Merapikan margin
3.	Tabel-tabel dirapikan	Merapikan format tabel pada laporan
4.	Perhitungan suhu dicek ulang	Mengkoreksi konversi perhitungan suhu
5.	Kesimpulan 1 dan 2 dinyatakan kuantitatif, besar perubahan, dan satuan spesifiknya terutama untuk emisi	Mencantumkan nilai hasil perhitungan beserta satuannya pada kesimpulan
6.	Reaksi kimia pembakaran dan emisi yang dihasilkan hubungkan dengan variasi kondisi	Penjelasan yang diminta telah tertera pada Bab 4

	pembakaran yang dihasilkan	
7.	Bagaimana jika kondisi supply oksigen berubah, kenapa dalam pembakaran supply oksigen bisa berubah (F/A)?	Penjelasan yang diminta telah tertera pada Bab 4
8.	Jelaskan apa kelemahan dari insinerator dalam penyisihan emisi?	Penjelasan yang diminta telah tertera pada Bab 2
9.	Apakah insinerator menggunakan bahan bakar? Kira-kira apakah bisa insinerator berjalan jika injeksi bahan bakarnya diawal saja?	Penjelasan yang diminta telah tertera pada Bab 2
10.	Faktor apa saja yang bisa menyebabkan pembakaran?	Penjelasan yang diminta telah tertera pada Bab 2
11.	Campuran oksigen dengan bahan bakar termasuk kategori "rich" atau "lean". Tolong dijelaskan bedanya dan bagaimana dengan penelitian ini?	Penjelasan yang diminta telah tertera pada Bab 2 dan Bab 4
12.	Dalam perhitungan DRE dari mana angka 0,018 kg?	Mencantumkan perhitungan detail untuk produksi abu pada sub bab nilai DRE di Bab 4
13.	Judul di Kata Pengantar diperbaiki	Memperbaiki penulisan judul pada Kata Pengantar
14.	Penulisan di daftar isi, daftar tabel, dan daftar gambar diperbaiki	Memperbaiki alignment pada daftar isi, daftar tabel, dan daftar gambar
15.	Terdapat ada bagian yang tidak sesuai dengan	Menghilangkan sub bab tahap persiapan penelitian

	metode penelitian setelah ada perubahan	serta alat dan bahan pada bab metodologi penelitian
--	---	---