



**LEMBAR PENGESAHAN USULAN PROGRAM PENELITIAN  
TAHUN AKADEMIK 2024/2025  
1045/PUF/FAL/TL/2024-2025**

- 1. Judul Penelitian** : Evaluasi Kinerja Unit Pembakaran Sampah menggunakan Wet Scrubber pada Asap Hasil Pembakaran
- 2. Skema Penelitian** : Penelitian Unggulan Fakultas (PUF)
- 3. Ketua Tim Pengusul**
- a. Nama : Dr. Ir. Ratnaningsih, M.T.
- b. NIDN : 8946140022
- c. Jabatan/Golongan : Lektor Kepala/IV-A
- d. Program Studi : TEKNIK LINGKUNGAN
- e. Perguruan Tinggi : Universitas Trisakti
- f. Bidang Keahlian : Pengolahan Air Limbah
- g. Alamat Kantor/Telp/Fak/surel : Jl. Elang Malindo X Blok C4-36, Kelurahan Cipinang Melayu, Kecamatan Makasar, Jakarta Timur, 13620  
085974902463  
ratnaningsih@trisakti.ac.id
- 4. Anggota Tim Pengusul**
- a. Jumlah anggota : Dosen 2 orang
- b. Nama Anggota 1/bidang keahlian : Sarah Aphirta, S.T., M.T./Teknik Lingkungan  
DR.ENG. ERSAN YUDHAPRATAMA MUSLIH, S.SI.,
- c. Nama Anggota 2/bidang keahlian : MSC.ENG./Renewable Energy, Perovskite Solar Cells, Materials, Chemistry
- d. Jumlah mahasiswa yang terlibat : 2 orang
- e. Jumlah alumni yang terlibat : 0 orang
- f. Jumlah laboran/admin : 0 orang
- 5. Waktu Penelitian**
- Bulan/Tahun Mulai : Januari 2025
- Bulan/Tahun Selesai : September 2025
- 6. Luaran yang dihasilkan** :
- Hak Kekayaan Intelektual
  - Artikel Ilmiah
  - Bahan Ajar
- 7. Biaya Total** : Rp0,-  
( )

Ketua Program Studi



Astari Minarti, S.T., M.Sc.

NIDN: 0303108402

Jakarta,  
Ketua Tim Pengusul



Dr. Ir. Ratnaningsih, M.T.

NIDN: 8946140022

Direktur



Prof. Dr. Ir. Astri Rinanti, M.T., IPM., ASEAN Eng.

NIDN: 0308097001

Dekan



Dr. Ir. Silia Yuslim, M.T.

NIDN: 0305126701



**KONTRAK PELAKSANAAN PENELITIAN UNGGULAN FAKULTAS**

Nomor: 1006/PL/FALTL/IX/2025

Pada hari ini tanggal Delapan Bulan September tahun Dua puluh dua lima , kami yang bertanda tangan di bawah ini:

1. Dr. Ir. Silia Yuslim, M.T.  
1961/USAKTI Dalam hal ini bertindak untuk dan atas nama Fakultas Arsitektur Lanskap Dan Teknologi Lingkungan, penanggung jawab **Penelitian Unggulan Fakultas Tahun Anggaran 2024/2025** untuk selanjutnya disebut **PIHAK PERTAMA**;
2. Dr. Ir. Ratnaningsih, M.T.  
1441/USAKTI Dalam hal ini bertindak sebagai pengusul dan **Ketua Peneliti Penelitian Unggulan Fakultas Tahun Anggaran 2024/2025** untuk selanjutnya disebut **PIHAK KEDUA**.

**PIHAK PERTAMA** dan **PIHAK KEDUA**, secara bersama-sama sepakat mengikatkan diri dalam suatu **Kontrak Pelaksanaan Penelitian Unggulan Fakultas Tahun Anggaran 2024/2025** dengan ketentuan dan syarat-syarat sebagai berikut:

**PASAL 1**

**DASAR HUKUM**

**Kontrak Penelitian** ini berdasarkan kepada:

1. Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 12 Tahun 2012 tentang Pendidikan Tinggi (Lembaran Negara Republik Indonesia tahun 2003 Nomor 78, Tambahan Lembaran Negara Republik Indonesia Nomor 4301)
2. Peraturan Menteri Riset, Teknologi dan Pendidikan Tinggi No. 44 Tahun 2015 tentang Standar Nasional Pendidikan Tinggi
3. Peraturan Pemerintah Nomor 4 Tahun 2014 tentang Penyelenggaraan Pendidikan Tinggi dan Pengelolaan Perguruan Tinggi
4. Peraturan Menteri Riset, Teknologi dan Pendidikan Tinggi Nomor 20 Tahun 2017 tentang Tunjangan Profesi Dosen dan Tunjangan Kehormatan Professor
5. Peraturan Menteri Pendidikan dan Kebudayaan Nomor 3 Tahun 2020 tentang Standar Nasional Pendidikan Tinggi
6. Pedoman Operasional tentang Penilaian Angka Kredit Kenaikan Jabatan Akademik/Pangkat Dosen Tahun 2019.
7. Statuta Universitas Trisakti tahun 2015
8. Keputusan Rektor Universitas Trisakti Nomor 1401/USAKTI/SKR/XI/2015 tanggal 17 November 2015 tentang Struktur Organisasi dan Tata Kerja Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat Universitas Trisakti
9. Rencana Strategis dan Rencana Operasional Universitas Trisakti Tahun Akademik 2020/2021-2024/2025.
10. Peraturan Rektor Universitas Trisakti Nomor 17 Tahun 2020 tentang Pemberian Penghargaan Publikasi Karya Ilmiah, Hak Kekayaan Intelektual, Pengelola Jurnal dan Peninjau (*reviewer*) Universitas Trisakti
11. Surat Keputusan Rektor Universitas Trisakti Nomor 611/USAKTI/SKR/VI/2021 tentang Kewajiban Publikasi Karya Ilmiah Hasil Penelitian Dosen, Mahasiswa Program Sarjana,

Paraf  
DRPMF

Paraf  
wadir penelitian

Program Magister, Program Spesialis dan Program Doktor di Lingkungan Universitas Trisakti

12. Standar Mutu Pendidikan Universitas Trisakti Tahun 2020

## PASAL 2

### RUANG LINGKUP DAN IDENTITAS PENELITIAN

**PIHAK PERTAMA** memberi pekerjaan kepada **PIHAK KEDUA** dan **PIHAK KEDUA** menerima pekerjaan tersebut dari **PIHAK PERTAMA**, untuk melaksanakan dan menyelesaikan Penelitian Unggulan Fakultas Tahun Anggaran 2024/2025 dengan identitas sebagai berikut:

1. Judul Penelitian	: Evaluasi Kinerja Unit Pembakaran Sampah menggunakan Wet Scrubber pada Asap Hasil Pembakaran
2. Fokus Penelitian	: Green Urban Environment
3. Rumpun Penelitian	: Green design & Livable Space
4. Mata Kuliah yang terkait	: Pengolahan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun (B3)
5. Pengabdian Kepada Masyarakat terkait	: Edukasi pemilahan limbah di lingkungan sekitar Teaching Factory dan berdampak ekonomi

Dengan anggota peneliti sebagai berikut:

No	Peneliti	Status	Posisi	Program Studi
1.	Dr. Ir. Ratnaningsih, M.T.	Dosen Universitas Trisakti	Ketua	Teknik Lingkungan
2.	Sarah Aphirta, S.T., M.T.	Dosen Universitas Trisakti	Anggota	Teknik Lingkungan
3.	Dr.Eng. Ersan Yudhapratama Muslih, S.Si., M.Cc.Eng.	Dosen Universitas Trisakti	Anggota	Teknik Lingkungan
4.	Febriano Dilla Saputra	Mahasiswa Universitas Trisakti	Anggota	Teknik Lingkungan
5.	Kendrick Kevin Kabe	Mahasiswa Universitas Trisakti	Anggota	Arsitektur Lanskap

## PASAL 3

### DANA PENELITIAN

- Besarnya dana untuk melaksanakan penelitian dengan judul sebagaimana dimaksud pada Pasal 2 adalah sebesar total Rp16.500.000,- (Enam Belas Juta Lima Ratus Ribu Rupiah).

2. Dana Penelitian sebagaimana dimaksud pada ayat (1) dibebankan pada Mata Anggaran (MA) , Fakultas Fakultas Arsitektur Lanskap dan Teknologi Lingkungan, Universitas Trisakti.

#### PASAL 4

#### TATA CARA PEMBAYARAN DANA PENELITIAN

1. **PIHAK PERTAMA** akan membayarkan Dana Penelitian kepada **PIHAK KEDUA** sebesar Rp16.500.000,- (Enam Belas Juta Lima Ratus Ribu Rupiah) yang dibayarkan secara bertahap
2. Pembayaran Tahap Pertama sebesar 70% dari total dana penelitian yaitu 70% x Rp16.500.000,- = Rp11.550.000,- (*Sebelas Juta Lima Ratus Lima Puluh Ribu Rupiah*), akan dibayarkan oleh **PIHAK PERTAMA** kepada **PIHAK KEDUA** setelah **PARA PIHAK** membuat dan melengkapi proposal penelitian yang memuat judul penelitian, maksud dan tujuan penelitian, metodologi penelitian, data yang akan diperoleh, Rencana Anggaran Biaya, *Road Map* Penelitian serta luaran yang dijanjikan.
3. Pembayaran Tahap Kedua sebesar 30% dari total dana penelitian yaitu 30% x Rp16.500.000,- = Rp4.950.000,- (*Empat Juta Sembilan Ratus Lima Puluh Ribu Rupiah*), akan dibayarkan oleh **PIHAK PERTAMA** kepada **PIHAK KEDUA** setelah **PIHAK KEDUA** menyerahkan laporan akhir penelitian dan luaran penelitian yang dijanjikan.
4. Dana Penelitian sebagaimana dimaksud pada ayat (1) akan disalurkan oleh **PIHAK PERTAMA** kepada **PIHAK KEDUA** ke rekening ketua peneliti sebagai berikut:

Nama : Ratnaningsih.IR  
Nomor Rekening : 0017845984  
Nama Bank : BNI Harmoni  
NPWP : 058590571005000

#### PASAL 5

#### JANGKA WAKTU

Jangka waktu pelaksanaan kegiatan penelitian sebagaimana dimaksud dalam Pasal 2 sampai selesai 100%, adalah sekurang-kurangnya berlangsung selama 6 bulan atau terhitung sejak tanggal 01 Januari 2025 dan berakhir pada 30 September 2025

#### PASAL 6

#### TARGET LUARAN

1. **PIHAK KEDUA** berkewajiban untuk mencapai target luaran wajib penelitian berupa:
  - a. Artikel Ilmiah - Jurnal Nasional Terakreditasi
  - b. Hak Kekayaan Intelektual - Hak Cipta
  - c. Bahan Ajar - Materi Paparan Format Powerpoint
2. **PIHAK KEDUA** berkewajiban untuk melaporkan perkembangan pencapaian target luaran sebagaimana dimaksud pada ayat (1) kepada **PIHAK PERTAMA**.

## PASAL 7

### HAK DAN KEWAJIBAN PARA PIHAK

1. Hak dan Kewajiban **PIHAK PERTAMA**:
  - a. **PIHAK PERTAMA** berhak mendapatkan dari **PIHAK KEDUA** luaran penelitian sebagaimana dimaksud dalam Pasal 6;
  - b. **PIHAK PERTAMA** berkewajiban untuk memberikan dana penelitian kepada **PIHAK KEDUA** dengan jumlah sebagaimana dimaksud dalam Pasal 3 ayat (1) dan dengan tata cara pembayaran sebagaimana dimaksud dalam Pasal 4.
2. Hak dan Kewajiban **PIHAK KEDUA**:
  - a. **PIHAK KEDUA** berhak menerima dana penelitian dari **PIHAK PERTAMA** dengan jumlah sebagaimana dimaksud dalam Pasal 2 ayat (1);
  - b. **PIHAK KEDUA** berkewajiban menyerahkan kepada **PIHAK KEDUA** luaran Penelitian Unggulan Fakultas dengan judul "**Evaluasi Kinerja Unit Pembakaran Sampah menggunakan Wet Scrubber pada Asap Hasil Pembakaran**".
  - c. **PIHAK KEDUA** berkewajiban menggunakan dana penelitian yang diterimanya sesuai dengan proposal kegiatan yang telah disetujui;
  - d. **PIHAK KEDUA** berkewajiban untuk menyampaikan kepada **PIHAK PERTAMA** laporan penggunaan dana sebagaimana dimaksud dalam Pasal 8.

## PASAL 8

### LAPORAN PELAKSANAAN PENELITIAN

1. **PIHAK KEDUA** berkewajiban untuk menyampaikan kepada **PIHAK PERTAMA** berupa Laporan Kemajuan, Laporan Akhir, Luaran Penelitian serta rekapitulasi penggunaan anggaran sesuai dengan jumlah dana yang diberikan oleh **PIHAK PERTAMA** yang tersusun secara sistematis sesuai pedoman yang ditentukan oleh **PIHAK PERTAMA**.
2. **PIHAK KEDUA** berkewajiban menyerahkan Laporan Kemajuan, Laporan Akhir, serta Bukti Luaran Penelitian kepada **PIHAK PERTAMA** dengan cara mengunggah pada Sistem Informasi Manajemen Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat Universitas Trisakti <https://simppm.trisakti.ac.id/> sesuai waktu yang ditentukan **PIHAK PERTAMA**
3. Laporan Kemajuan dan Laporan Akhir Penelitian sebagaimana tersebut pada Pasal 8 ayat (1) serta semua luaran sebagaimana tersebut pada Pasal 6 ayat (1) harus mencantumkan:

**Penelitian ini dibiayai oleh:**

**Fakultas Arsitektur Lanskap Dan Teknologi Lingkungan Universitas Trisakti**

**dengan Kontrak Pelaksanaan Penelitian Unggulan Fakultas**

**Nomor: 1006/PL/FALTL/IX/2025**

## PASAL 9

### MONITORING DAN EVALUASI

**PIHAK PERTAMA** dalam rangka pengawasan akan melakukan Monitoring dan Evaluasi internal terhadap kemajuan pelaksanaan Penelitian Tahun Anggaran 2024/2025 pada bulan Maret sampai dengan April 2024

Paraf DRPMF 	Paraf wadir penelitian
--	---------------------------

## PASAL 10 PENILAIAN LUARAN

Penilaian luaran penelitian dilakukan oleh Komite Penilai/*Reviewer* Luaran yang ditentukan oleh Dewan Riset dan Penelitian Fakultas (DRPMF) sesuai dengan ketentuan yang berlaku.

## PASAL 11 PERUBAHAN SUSUNAN TIM PENELITI DAN SUBSTANSI PELAKSANAAN

Perubahan terhadap susunan tim peneliti dan substansi penelitian ini dapat dibenarkan apabila telah mendapat persetujuan tertulis dari Direktur Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat, Universitas Trisakti atas pertimbangan Dewan Riset dan Penelitian Fakultas (DRPMF)

## PASAL 12 PENGANTIAN KETUA PENELITI

1. Apabila **PIHAK KEDUA** selaku ketua peneliti tidak dapat melaksanakan penelitian ini, maka **PIHAK KEDUA** wajib mengusulkan pengganti ketua peneliti yang merupakan salah satu anggota tim kepada **PIHAK PERTAMA**.
2. Apabila **PIHAK KEDUA** tidak dapat melaksanakan tugas dan tidak ada pengganti ketua sebagaimana dimaksud pada ayat (1), maka **PIHAK KEDUA** harus mengembalikan dana penelitian kepada **PIHAK PERTAMA** disertai dengan surat pemberitahuan pengembalian dana.
3. Bukti setor sebagaimana dimaksud pada ayat (2) disimpan oleh **PIHAK PERTAMA**.

## PASAL 13 SANKSI

1. Apabila sampai dengan batas waktu yang telah ditetapkan untuk melaksanakan penelitian ini telah berakhir, namun **PIHAK KEDUA** belum menyelesaikan tugasnya, terlambat mengirim Laporan Kemajuan, dan/atau terlambat mengirim Laporan Akhir, maka **PIHAK KEDUA** dikenakan sanksi administratif berupa penghentian pembayaran dan tidak dapat mengajukan proposal penelitian dalam kurun waktu satu tahun akademik.
2. Apabila **PIHAK KEDUA** tidak dapat mencapai target luaran sebagaimana dimaksud dalam Pasal 5, maka kekurangan capaian target luaran tersebut akan dicatat sebagai hutang **PIHAK KEDUA** kepada **PIHAK PERTAMA** yang apabila tidak dapat dilunasi oleh **PIHAK KEDUA**, akan berdampak pada kesempatan **PIHAK KEDUA** untuk mendapatkan pendanaan penelitian atau hibah lainnya yang dikelola oleh **PIHAK PERTAMA**.

## PASAL 14 PEMBATALAN PERJANJIAN

1. Apabila di kemudian hari terhadap judul Penelitian Unggulan Fakultas sebagaimana dimaksud dalam Pasal 2 ditemukan adanya duplikasi dengan penelitian lain dan/atau



ditemukan adanya ketidakjujuran, itikad tidak baik, dan/atau perbuatan yang tidak sesuai dengan kaidah ilmiah dari atau dilakukan oleh **PIHAK KEDUA**, maka perjanjian Penelitian ini dinyatakan batal dan **PIHAK KEDUA** wajib mengembalikan dana penelitian yang telah diterima kepada **PIHAK PERTAMA**

2. Bukti setor sebagaimana dimaksud pada ayat (1) disimpan oleh **PIHAK PERTAMA**.

Paraf DRPMF 	Paraf wadir penelitian
--	---------------------------

**PASAL 15**

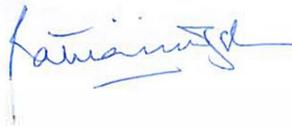
**PENUTUP**

Kontrak Penelitian ini dibuat rangkap 2 (dua) bermaterai cukup sesuai dengan ketentuan yang berlaku.

Jakarta, September 2025

**PIHAK KEDUA**

Ketua Peneliti,



(Dr. Ir. Ratnaningsih, M.T.)

1441/USAKTI

**PIHAK PERTAMA**

Dekan FALTL,



(Dr. Ir. Silia Yuslim, M.T.)

1961/USAKTI

Mengetahui

Direktur Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat



(Prof. Dr. Ir. Astri Rinanti, M.T., IPM., ASEAN Eng.)

2234/USAKTI

Paraf  
DRPMF

Paraf  
wadir penelitian

**PASAL 15**

**PENUTUP**

Kontrak Penelitian ini dibuat rangkap 2 (dua) bermaterai cukup sesuai dengan ketentuan yang berlaku.

Jakarta, September 2025

**PIHAK KEDUA**

Ketua Peneliti,



(Dr. Ir. Ratnaningsih, M.T.)

1441/USAKTI

**PIHAK PERTAMA**

Dekan FALTL,



(Dr. Ir. Silia Yuslim, M.T.)

1961/USAKTI

Mengetahui

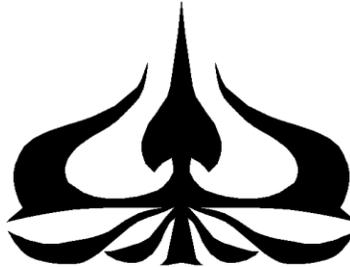
Direktur Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat



(Prof. Dr. Ir. Astri Rinanti, M.T., IPM., ASEAN Eng.)

2234/USAKTI

**LAPORAN AKHIR**  
**PENELITIAN UNGGULAN FAKULTAS**  
**TA. 2024/2025**



**Evaluasi Kinerja Unit Pembakaran Sampah menggunakan Wet Scrubber pada Asap Hasil Pembakaran**

**OLEH :**

Dr. Ir. Ratnaningsih, M.T	(8946140022)	Ketua
Sarah Aphirta, S.T., M.T	(0321129501)	Anggota
Dr.Eng. Ersan Yudhapratama Muslih, S.Si., M.Sc.Eng	(0821128701)	Anggota

**UNIVERSITAS TRISAKTI**

**2025**

## DAFTAR ISI

Halaman Judul .....	i
Lembar Pengesahan .....	ii
Identitas Penelitian .....	iii
DAFTAR ISI.....	1
DAFTAR TABEL.....	2
DAFTAR GAMBAR .....	3
RINGKASAN PENELITIAN.....	4
BAB 1. PENDAHULUAN .....	5
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA .....	8
BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN .....	20
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN .....	26
BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN .....	37
DAFTAR PUSTAKA .....	38
LAMPIRAN 1. ROAD MAP PENELITIAN .....	40
LAMPIRAN 2. LUARAN PENELITIAN.....	42

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b> Penanganan dan Pengolahan sampah berdasarkan komposisi .....	10
<b>Tabel 2.2</b> Baku Mutu Udara Ambien.....	14
<b>Tabel 3.1</b> Standar Baku Mutu Udara Ambien.....	26
<b>Tabel 3.2</b> Standar Baku Mutu Insinerasi .....	26
<b>Tabel 3.3</b> Spesifikasi <i>Nozzle</i> .....	27
<b>Tabel 4.1</b> Jumlah Sampah yang masuk TPS Trisakti.....	29
<b>Tabel 4.2</b> Jenis sampah dan emisi .....	30

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b> Lokasi Teaching Factory waste to value Trisakti desa Nagrak .....	9
<b>Gambar 2.2</b> Komponen dari insenerator (Hutter, 1997) .....	12
<b>Gambar 2.3</b> Prinsip kerja <i>Wet Scrubber</i> .....	17
<b>Gambar 2.3</b> <i>wet scrubber tower sprayer</i> .....	18
<b>Gambar 2.4</b> <i>Venturi wet scrubber system</i> .....	19
<b>Gambar 3. 1.</b> Alur Penelitian .....	23
<b>Gambar 3.2.</b> Desain Insenerator yang digunakan .....	25
<b>Gambar 3.3.</b> Tampak atas Insenerator dan Titik Sampling .....	25
<b>Gambar 4.1</b> Lay out Tempat Pengolahan Sampah Teaching Factory waste to Value .....	28
<b>Gambar 4.3a</b> Grafik Konsentrasi CO dan CO <sub>2</sub> pada Gas buang kondisi tanpa Nozzle .....	32
<b>Gambar 4.3b</b> Grafik Pengaruh penambahan Nozle terhadap konsentrasi CO dan CO <sub>2</sub> pada gas buang .....	33
<b>Gambar 4.4a.</b> Pengaruh Koagulan Biji Kelor terhadap penurunan Kekeruhan .....	34
<b>Gambar 4.4b.</b> Pengaruh Koagulan Biji Kelor terhadap pH .....	35
<b>Gambar 4.4c</b> Pengaruh koagulan Chitosan terhadap kekeruhan .....	35
<b>Gambar 4.4d</b> Pengaruh koagulan Chitosan terhadap pH .....	36

## RINGKASAN PENELITIAN

Dalam upaya mengurangi ketergantungan pada Tempat pembuangan sampah Akhir (TPSA), Universitas Trisakti mengembangkan Teaching Factory di Kampus Nagrak untuk mengolah sampah menjadi produk bernilai tambah, seperti *Refuse Derived Fuel* (RDF); namun masih ada sampah residu yang tersisa. Untuk mencapai *Zero Waste to Landfill*, maka dibangun unit insenerasi yang dilengkapi *wet scrubber*. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kinerja insinerator dan *wet scrubber* dalam mengurangi emisi polutan, dengan fokus pada analisis kualitas gas buang dan air limbah, serta memberikan rekomendasi perbaikan alat. Penelitian dimulai dengan menganalisis jumlah sampah yang masuk, komposisi sampah, dan jenis serta jumlah sampah yang masuk ke unit insinerasi. Untuk mendapatkan kinerja *wet scrubber* yang optimal, maka dipasang *nozzle* pemancar air yang divariasikan mulai 1 sampai 4 *nozzles*. Pengamatan dilakukan pada emisi gas buang selama 1 minggu berturut turut dengan parameter  $PM_{2.5}$ ;  $CO_2$  dan  $CO$  dan dilakukan pengulangan 2 kali. Pada air bekas pencucian dilakukan pengolahan menggunakan jarstest dengan koagulan alami, biji kelor dan chitosan, variasi dosis 5 ppm, 10 ppm, 15 ppm, 25 ppm dan 125 ppm; parameter yang diamati meliputi kekeruhan, pH, temperature, COD. Hasil penelitian menunjukkan bahwa suhu pembakaran berkisar 350–400 °C, penggunaan *nozzle* pada *wet scrubber* memberikan kontribusi yang significant dalam mengurangi zat pencemar, dengan menggunakan *nozzle*  $PM_{2.5}$  turun dari 120-129  $\mu g/m^3$  menjadi 45-71  $\mu g/m^3$ ,  $CO_2$  turun dari 112-119  $\mu g/m^3$  menjadi 63-85  $\mu g/m^3$  dan  $CO$  dari 146-167  $\mu g/m^3$  menjadi 69-94  $\mu g/m^3$  (stadard baku mutu emisi gas buang adalah  $PM_{2.5}$  55  $\mu g/m^3$  dan  $CO$  400  $\mu g/m^3$ ). Selain itu pengolahan air bekas pembersih yang terbaik adalah menggunakan chitosan pada dosis 5 ppm dapat menurunkan kekeruhan dari 28,7 NTU menjadi 3,1 NTU pada pH 7,2; sudah memenuhi syarat air bersih (kekeruhan 3 NTU dan pH 68-7,2). Penelitian ini sangat relevan dan sejalan dengan penelitian Ratnaningsih yaitu pengelolaan dan pengolahan sampah. Kesimpulan sementara adalah dalam upaya zero to land fill, system pembakaran sampah dapat digunakan sebagai alat mengurangi sampah residu namun harus dilengkapi dengan alat pembersihan asap, salah satunya adalah *wet scrubber*, penggunaan 4 *nozzle* pada *wet scrubber* sangat efektif dalam menurunkan kadar polutan gas buang. Penelitian ini baru merupakan penelitian awal, oleh karena itu perlu dilanjutkan dengan meneliti variasi jenis sampah sebagai input tungku pembakaran sampah, laju airan dan lain sebagainya.

Kata Kunci :

Pengolahan sampah, Insinerasi, Emisi Karbon, *Wet Scrubber*, Koagulan alami

## BAB 1. PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Indonesia saat ini sedang mengalami krisis TPA (Tempat Pembuang Sampah Akhir), hal ini disebabkan karena timbulan sampah yang terus meningkat, yang disebabkan jumbuh penduduk yang meningkat pesat dari tahun ke tahun. Sampah kota yang dihasilkan dari aktivitas rumah tangga, komersial, institusi, dan industri skala kecil di wilayah perkotaan, umumnya terdiri dari berbagai jenis material, termasuk sampah organik, plastik, kertas, logam, kaca, dan limbah berbahaya rumah tangga (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2023). Berdasarkan data Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) Indonesia, pada tahun 2022, total produksi sampah di Indonesia mencapai 70 juta ton per tahun, dengan komposisi terbesar berasal dari sampah organik (60%), diikuti oleh plastik (14%), kertas (9%), logam (4%), kaca (3%), dan limbah lainnya (10%) (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2023). Umumnya kota di Indonesia mengelola sampah di TPSA dengan pola penanganan sampah yang masih kumpul angkut dan buang (konvensional), sehingga menyebabkan sampah menunggung dan telah memperburuk kondisi lingkungan sekitar. Pada dasarnya sampah yang dihasilkan dari kegiatan domestik masih banyak yang bisa didaur ulang, namun karena penanganan sampah yang tidak pilah dan ditangani dengan cepat, maka sampah menjadi busuk dan mengganggu lingkungan.

Beberapa cara pengolahan sampah seperti proses pengolahan secara fisik, kimiawi maupun biokonversi. Sistem insinerasi sampah merupakan salah satu pengolahan fisik sampah yang sering digunakan. Pembakaran dan sistem pengolahan limbah suhu tinggi lainnya digambarkan sebagai "pengolahan termal". Pembakaran bahan limbah mengubah limbah menjadi abu, cerobong asap, dan panas. Insinerator mengurangi massa padat limbah asli sebesar 80–85% (Cyril Varghese, et al 2016).

Permasalahan yang dihadapi pada pengolahan termal sampah adalah tingginya kadar air, yang dapat mencapai 70% massa [Globesnewswire et al, 2020 pada Rudend dan Hermana, 2020]. Kadar air sampah yang tinggi ini dapat menyebabkan turunnya suhu nyala pembakaran pada insinerator. Kinerja sistem pengolahan termal berupa kecepatan pembakaran, suhu dan komposisi gas buang dipengaruhi oleh beberapa parameter, diantaranya yaitu: komposisi dan sifat fisik sampah seperti kadar air sampah sehingga perlu dilakukan adanya kajian terhadap pembakaran sampah pada insinerator. (Rudend dan Hermana, 2020). Selanjutnya Rudend dan Hermana, 2

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

Permasalahan yang timbul dari system insinerasi adalah dihasilkannya emisi gas buang yang mengandung polutan berbahaya seperti partikulat halus ( $PM_{2.5}$ ), karbon dioksida ( $CO_2$ ), sulfur dioksida ( $SO_2$ ), karbon monoksida (CO), nitrogen dioksida ( $NO_2$ ), serta senyawa beracun lainnya seperti dioksin dan furan (Idris et.al., 2024). Emisi karbon ( $CO_2$ ) dari aktivitas pembakaran sampah sangat berdampak

negative pada keberlangsungan hidup Mahluk hidup. Emisi karbon yang tinggi berakibat pada *global warming*, pengasaman laut, kenaikan permukaan air laut, kerugian ekonomi, dan meningkatnya penyakit menular. Saat ini CO<sub>2</sub> di atmosfer melebihi tingkat tertinggi. Hal itu menunjukkan adanya gangguan terhadap tren CO<sub>2</sub> yang telah lama ada di atmosfer bumi. Pembakaran sampah, selain menghasilkan polutan seperti gas CO<sub>2</sub> (penyebab pemanasan global), gas CO (bersifat racun didalam darah), gas SO<sub>x</sub> (penyebab hujan asam), gas NO<sub>x</sub> (penyebab terbentuknya kabut asap (*smog*), dan partikulat (C dan Pb) Pembakaran sampah merupakan jenis pembakaran yang tidak sempurna.

Pencegahan pencemaran udara pada penggunaan insinerator dapat dilakukan melalui, memilih jenis sampah yang masuk kepembakaran, dan melakukan proses memperangkap (*scrubbing*) asap yang dihasilkan sebelum dibuang ke udara. Hal ini merupakan Tindakan pengurangan emisi karbon atau *Carbon Reduction* dan bahan pencemar menjadi upaya penting untuk memitigasi dampak negatif yang dihasilkan guna mendukung agenda keberlanjutan global dan mitigasi perubahan iklim. Pendekatan ini tidak hanya bertujuan mengurangi dampak lingkungan, tetapi juga mendorong inovasi dalam pengelolaan limbah dan penggunaan teknologi ramah lingkungan. Salah satu langkah penting dalam upaya ini adalah pemanfaatan limbah industri sebagai sumber material bernilai tambah, seperti konversi limbah menjadi karbon aktif atau karbon hitam. Dalam konteks ini, pengembangan fasilitas berbasis *Teaching Factory* di Universitas Trisakti memainkan peran penting, di mana kegiatan pembelajaran, penelitian, dan produksi bersinergi untuk menghasilkan produk ramah lingkungan berdasarkan prinsip ekonomi sirkular.

Universitas Trisakti memiliki *Teaching Factory* Olah Sampah Terpadu di Kampus Nagrak, dengan fasilitas pengolahan sampah memiliki saat ini adalah unit pengolahan sampah menjadi *Refuse Derived Fuel* (RDF) untuk sampah campuran, *Black Soldier Fly* (BSF) dalam mengolah sampah sisa makanan, dan untuk pengolahan sampah residu menggunakan insinerator yang dilengkapi dengan *wet scrubber*. Insinerasi sampah residu menggunakan *wet scrubber* bertujuan untuk mengurangi emisi zat pencemar yang dihasilkan pada asap sebagai hasil pembakaran. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kinerja alat insinerator dan kemampuan *wet scrubber* yang dioperasikan dengan berbagai variasi sampah yang masuk, dan kecepatan pembakaran.

## 1.2. Perumusan Masalah

Rumusan masalah yang melatarbelakangi penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a) Masih banyaknya sampah dibakar secara terbuka di perumahan, maupun di Tempat Pembuangan Sampah (TPA) informal, dan cenderung menghasilkan residu sehingga perlu ditangani dengan cepat.
- b) Pengolahan sampah dengan menggunakan system insinerasi, merupakan penyelesaian yang cepat namun berpotensi mencemari udara.
- c) Insinerator yang dilengkapi dengan *wet scrubbing* dalam memperangkap zat pencemar yang ditimbulkan pada asap hasil pembakaran perlu dievaluasi, agar mendapatkan alat incinerator yang ramah lingkungan dan ekonomis.

## 1.3. Tujuan Penelitian

Maksud penelitian ini adalah melakukan uji kinerja (evaluasi) unit pembakaran sampah domestik menggunakan *wet scrubbing* dalam menurunkan zat pencemar pada asap hasil pembakaran. Adapun tujuannya adalah:

1. Analisis Jenis dan karakteristik Sampah yang masuk ke unit pembakaran
2. Menentukan jumlah air optimal yang digunakan dalam *wet scrubber* untuk mengurangi emisi.
3. Menganalisis kualitas air limbah yang keluar dari *wet scrubbing*
4. Menentukan jenis dan dosis koagulan alami yang tepat dalam menurunkan zat pencemar yang terperangkap.
5. Membuat rekomendasi perbaikan alat insinerator dan *system wet scrubbing*

#### **1.4. Batasan Penelitian**

1. Penelitian dilakukan pada unit pembakar sampah *system wet scrubbing* yang digunakan pada Pengolahan Sampah waste to Value Kampus Nagrak Universitas Trisakti.
2. Bahan baku sampah adalah residu dari unit RDF dan BSF.

#### **1.5. Kaitan Penelitian dengan Road Map Penelitian Pribadi dan Road Map Penelitian Fakultas**

1. Penelitian pribadi Ratnaningsih secara umum mengenai pengolahan sampah organik dan *non – organic*, dan pengolahan limbah Cair.
2. Penelitian pribadi Hernani secara umum mengenai emisi gas buang dan pengendaliannya
3. Penelitian pribadi Ersan secara umum mengenai pengolahan limbah B3.
4. Penelitian pribadi Sarah Apherita secara umum terkait dengan rekayasa air limbah dan sanitasi

## BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

### **Teaching Factory Waste to Value Berbasis Digital**

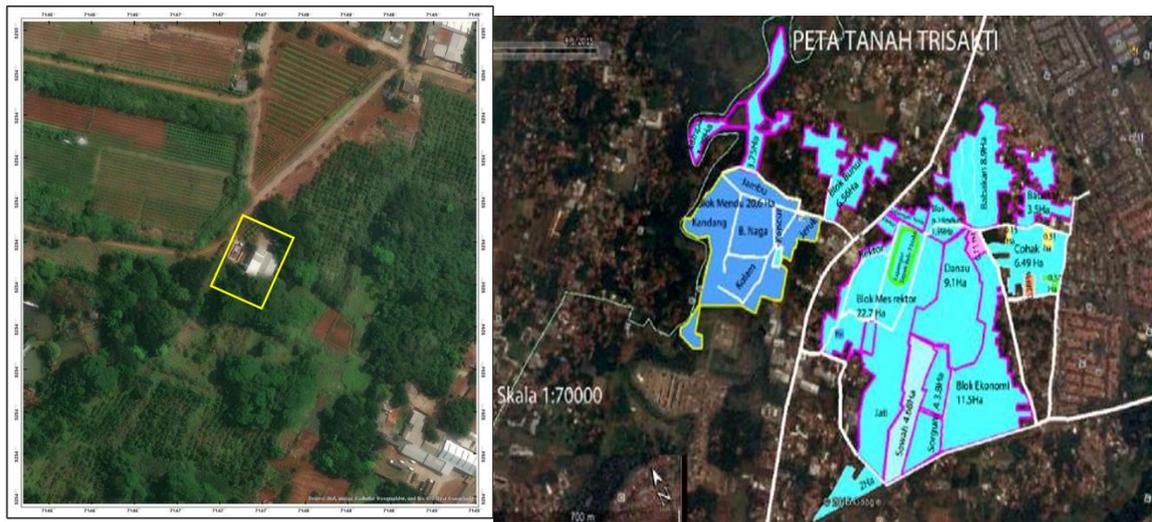
*Teaching Factory Waste to Value* berbasis digital merupakan unit dari Trisakti *Waste to Value Center* yang bergerak dalam manajemen pengolahan sampah terdesentralisasi berbasis digital dan *berorientasi smart waste management and circular economy* (Trisakti Waste to value Center,2023). Kegiatan pengolahan sampah pada Teaching Factory waste to value, dimulai sejak September 2022, melalui program Matching Fund/kedaireka Teaching Factory olah sampah terpadu skala kawasan berbasis digital ini, telah melibatkan 6 insan dikti dari universitas Trisakti, 8 mahasiswa Teknik Lingkungan dan Teknik Industri, dengan Mitra dunia usaha PT.Emsus Global Indonesia, mitra penerima manfaat adalah pemerintah desa Ciangsana dan desa Nagrak. (Ratnaningsih dkk,2022).

**Trisakti Teaching Factory (tefa) Waste to value**, merupakan tempat pembelajaran dan percontohan pengolahan sampah menjadi produk bernilai ekonomi, dan ramah lingkungan, terdesentralisasi.

Tefa *waste to value* Trisakti dapat bermitra dengan industri lokal, komunitas dan institusi pemerintahan, serta institusi akademik untuk menawarkan siswa mendapatkan pengetahuan praktis dan keterampilan dalam pengelolaan sampah. Dengan mengerjakan proyek industri nyata, para siswa akan mengidentifikasi sampah yang dihasilkan oleh aglomerasi perkotaan dan mengembangkan solusi yang mematuhi prinsip-prinsip ekonomi sirkular. Solusi yang dilakukan akan menciptakan model ekonomi sirkular yang memaksimalkan penerapan strategi 3R (*Reuse, Reduce, Recycle*) terhadap sumber daya produksi, seperti bahan, energi, dan kultur larva. Ini akan meningkatkan praktik pengelolaan sampah dengan memungkinkan transportasi sampah yang efisien, mengurangi jarak ke tempat pembuangan sampah, dan mendorong pemisahan sampah rumah tangga yang didorong oleh teknologi. Dengan memperluas kapasitas Teaching Factory, kegiatan ini diharapkan dapat meningkatkan efisiensi pengelolaan sampah dan memastikan masa depan yang berkelanjutan dengan memberdayakan masyarakat, menciptakan keterampilan baru dan usaha yang mendukung transisi ke ekonomi sirkular

Dalam Pengembangannya, menuju pengolahan sampah berkelanjutan, Teaching Factory waste to Value yang berlokasi di kampus Universitas Trisakti Nagrak, Kecamatan gunung Putri, kabupaten Bogor, Universitas Trisakti bekerjasama dengan PT.Tera Selaras Hijau, dan PT.Mitra karunia Indah. Fasilitas yang dikembangkan adalah, pengolahan sampah menjadi RDF, pengolahan sampah organik dengan Larva BSF, dan inserasi sampah residu, dengan system wet scrubbing. Kapasitas pengolahan sampah saat ini mencapai 30-50 ton/hari, yang mana sumber sampah dari pemukiman desa Ciangsana dan desa Nagrak serta Intergrated Trade Center Jakarta.

Pada gambar 2.1 dapat dilihat lokasi dan lay out Teaching Factory waste to value, di desa Nagrak, Kecamatan Gunung Putri, kabupaten Bogor.



**Gambar 2.1** Lokasi Teaching Factory waste to value Trisakti desa Nagrak

### Sampah Domestik

Pengertian Sampah domestik, berdasarkan **Undang-Undang Nomor 18 Tahun 2008 tentang Pengelolaan Sampah**, adalah jenis sampah yang berasal dari aktivitas sehari-hari di rumah tangga yang tidak mengandung bahan berbahaya dan beracun (B3). Sedangkan pada Pasal 1 Ayat 4 dijelaskan bahwa; Sampah rumah tangga adalah sampah yang berasal dari kegiatan sehari-hari dalam rumah tangga, tidak termasuk tinja dan sampah spesifik.

Sampah domestik mencakup limbah-limbah seperti: **Sampah organik**: sisa makanan, dedaunan, atau sisa tanaman. **Sampah anorganik**: plastik, kertas, logam, dan kaca yang digunakan dalam rumah tangga. Sampah domestik biasanya menjadi tanggung jawab pemerintah daerah untuk pengelolaannya, sesuai amanat Undang Undang tersebut, termasuk upaya pengurangan, pemilahan, pengangkutan, dan pengolahan guna mendukung pengelolaan sampah yang ramah lingkungan.

Pengelolaan sampah adalah kegiatan pengumpulan, pengangkutan, pengolah, mendaur ulang dari material sampah, Pengelolaan sampah bertujuan untuk mengurangi dampak terhadap Kesehatan masyarakat, lingkungan atau pun mengganggu estetika.

Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 97 Tahun 2017 tentang Kebijakan dan Strategi Nasional (Jaktranas) Pengelolaan Sampah Rumah Tangga atau disebut juga sampah domestik dan Sampah Sejenis Sampah Rumah Tangga ini diterbitkan pada tanggal 23 Oktober 2017, yang merupakan kelanjutan Peraturan Pemerintah Nomor 81 Tahun 2012 tentang Pengelolaan Sampah Rumah Tangga dan Sampah Sejenis Sampah Rumah Tangga, Pasal 6 yang menyatakan bahwa kebijakan dan strategi nasional dalam pengelolaan sampah ditetapkan dalam Peraturan Presiden. Pada Peraturan tersebut dinyatakan bahwa target pengelolaan sampah yang ingin dicapai adalah 100% sampah terkelola dengan baik dan benar pada tahun 2025 (Indonesia Bersih Sampah). Target ini diukur melalui pengurangan sampah sebesar 30%, dan penanganan sampah sebesar 70%.

Pengelolaan persampahan mempunyai beberapa tujuan yang sangat mendasar, antara lain untuk menciptakan estetika lingkungan, meningkatkan Kesehatan masyarakat dan lingkungan, melindungi sumber daya alam (khususnya air), melindungi fasilitas sosial ekonomi, dan menunjang pembangunan sector strategis lainnya. (Damanhuri dan Padmi, 2019).

Dengan munculnya isu pemanasan global di tahun 2000, negara berkembang dituntut untuk meningkatkan peran, termasuk investasi dan teknologinya, untuk mengurangi secara sistematis GRK di negara

masing masing, melalui program nyata, diantaranya melalui pengelolaan sampah yang berwawasan lingkungan. (Damanhuri & Padmi, 2019)

Indonesia berkomitmen untuk mencapai *zero carbon emission* pada tahun 2060, melalui program *Holistic, Integrative, Thematic and Spatial (HITS)* sejak tahun 2017 (Kementrian Koordinator Bidang Perekonomian RI, 2022)

### Pengolahan Sampah

Pengolahan sampah merupakan bagian dari pengelolaan sampah, yang mana berdasarkan Undang undang no 18 tahun 2008, pengolahan sampah didefinisikan sebagai proses perubahan bentuk sampah dengan mengubah karakteristik, komposisi, dan jumlah sampah.

Tujuan Pengolahan sampah adalah untuk mengurangi jumlah sampah, disamping memanfaatkan nilai yang masih terkandung dalam sampah itu sendiri (bahan daur ulang, produk lain, dan energi). Pengolahan sampah dapat dilakukan berupa: pengomposan, recycling/daur ulang, pembakaran (insinerasi), dan lain-lain.

Sesuai SNI 19-3964-1995, pengelompokan komposisi sampah menjadi 9 jenis, ditambah dengan bahan berbahaya dan beracun, maka Pengolahan sampah berdasarkan pada komposisinya dapat dilihat pada tabel 2.1 (Damanhuri & Padmi,2019).

**Tabel 2.1** Penanganan dan Pengolahan sampah berdaaskan komposisi

No	Komposisi	Penanganan dan Pengolahan
1	Sampah sisa makanan	<i>Putrescible, organik, biodegradable dan combustible</i>
2	Kayu,daun, sampah taman	Organik, <i>biodegradable dan combustible</i>
3	Kertas, karton	<i>biodegradable dan combustible dan Recyclable</i>
4	Tekstil dan produk tekstil	<i>Biodegradable</i> (tekstil bahan alami) <i>combustible dan Recyclable</i>
5	Karet dan Kulit	<i>Biodegradable</i> (karet bahan alami) <i>combustible dan Recyclable</i>
6	Plastik	<i>combustible dan Recyclable</i>
7	Besi dan logam lainnya	<i>Recyclable</i>
8	Gelas	<i>Recyclable</i>
9	Sampah berbahaya	Harus segera ditangani
10	Lain- lain bahan inert	Hanya lahan-pengukuran

Selanjutnya dalam Damanhuri & Padmi, 2019, dijelaskan tahapan dan pemilihan berbagai jenis pengolahan yaitu terdiri dari:

1. Pemilahan, dimana sampah dipilah sesuai dengan jenisnya
2. Transformasi mekanik, dengan tujuan memperkecil ukuran sampah, agar memperkecil volume sampah, dan memudahkan pengolahan selanjutnya. yaitu dengan melakukan pencacahan sampah yang telah dipilah sesuai dengan jenisnya.
3. Biokonversi, yaitu upaya mengolah sampah organik dengan menggunakan jasad renik baik berupa cacing, larva BSF, maupun mikroorganisme.

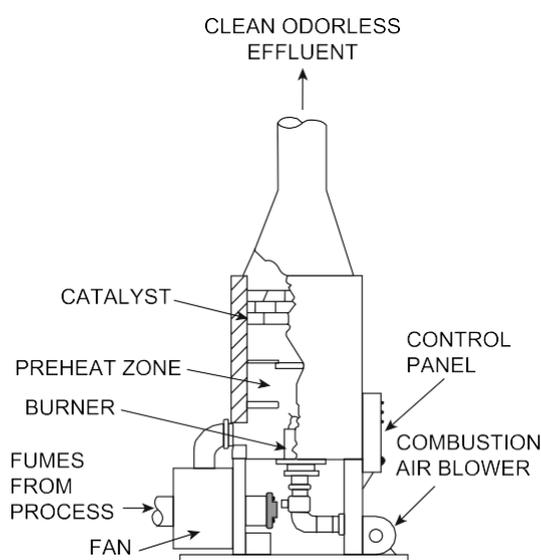
Tranformasi materi secara termal

### Teknologi Insinerasi

Insinerasi adalah proses pengolahan sampah yang dapat terbakar (*combustible*) dengan cara pembakaran pada temperatur sangat tinggi (.850°C) (Damanhuri & Padmi,2019). Teknologi insinerasi menyerupai pembakaran batu bara untuk mendapatkan panas guna menghasilkan energi listrik, pada pembangkit listrik tenaga uap (PLTU).

Insinerasi adalah proses pengolahan limbah yang melibatkan pembakaran zat organik yang terkandung dalam bahan limbah. Pembakaran dan sistem pengolahan limbah suhu tinggi lainnya digambarkan sebagai "perlakuan termal". Pembakaran bahan limbah mengubah limbah menjadi abu, cerobong asap, dan panas. Abu sebagian besar dibentuk oleh konstituen anorganik dari limbah, dan dapat berbentuk gumpalan padat yang dibawa oleh gas buang. Gas buang harus dibersihkan dari polutan gas dan partikulat dan hanya setelah itu dapat dilepaskan ke atmosfer. Dalam beberapa kasus, panas yang dihasilkan oleh pembakaran dapat digunakan untuk menghasilkan tenaga listrik. (Cyril Varghese, et al, 2016)

Insinerator mengurangi massa padat limbah sebesar 80-85% dan volume yang berkurang sebesar 95-96%, tergantung pada komposisi dan tingkat pemulihan bahan seperti logam untuk didaur ulang. Ini berarti bahwa meskipun pembakaran tidak sepenuhnya menggantikan pembuangan sampah, itu pasti mengurangi volume yang diperlukan untuk pembuangan. (Cyril Varghese, et al, 2016)



**Gambar 2.2** Komponen dari insenerator (Hutter, 1997)

Pembakaran adalah proses pengolahan limbah yang melibatkan pembakaran zat organik. Insinerator mengubah bahan limbah menjadi abu, limbah yang terbakar, gas buang, dan panas. Abu sebagian besar dibentuk oleh konstituen anorganik dari limbah dan dapat berbentuk gumpalan padat atau partikulat yang dibawa oleh gas buang. Gas buang harus bebas dari polutan gas dan partikulat sebelum tersebar ke atmosfer (Joseph.O, 2022).

Pembakaran yang bersih hanya bisa dilakukan dalam api panas dan suplai oksigen yang cukup. Padahal, pada pembakaran sampah yang umum dilakukan yakni sampah dalam tumpukan hanya bagian luar yang mendapat cukup oksigen untuk menghasilkan CO<sub>2</sub>. Sementara bagian dalam, karena kekurangan suplai O<sub>2</sub> akan menghasilkan karbon monoksida (CO). Satu ton sampah, akan menghasilkan sekitar 30 kg CO. CO adalah gas yang mampu membunuh orang secara massal. Bila dihirup, gas ini akan berikatan sangat kuat dengan hemoglobin darah. Akibatnya, hemoglobin yang semestinya mengangkut dan mengedarkan oksigen ke seluruh tubuh akan ter-ganggu. Tubuh akan kekurangan O<sub>2</sub> dan menimbulkan kematian (Rachmat R.dkk, 2013).

Secara umum terdapat dua jenis pembakaran. Pertama, pembakaran sempurna senyawa karbon adalah reaksi pembakaran yang menghasilkan produk akhir berupa karbon dioksida dan uap air. Reaksi tersebut berlangsung sempurna jika semua atom karbon teroksidasi sempurna menjadi karbon dioksida, dan semua atom hidrogen teroksidasi sempurna menjadi uap air. Kedua, pembakaran tidak sempurna senyawa karbon adalah reaksi pembakaran yang menghasilkan produk akhir selain karbon dioksida dan uap air. Reaksi itu berlangsung tidak sempurna jika semua atom karbon tidak teroksidasi sempurna menjadi karbondioksida atau semua atom hidrogen tidak teroksidasi sempurna menjadi uap air. Kinerja sebuah insenerator dapat terlihat dari perbandingan seberapa banyak pembakaran sempurna dengan pembakaran tidak sempurna yang disebut dengan Efisiensi Pembakaran (*Combustion Efficiency*).

Efisiensi Pembakaran adalah Pengukuran efisiensi sebuah insenerator dengan mengukur seberapa baik proses pembakaran mengubah karbon dalam limbah menjadi CO<sub>2</sub> dan CO. Rumusnya adalah:

$$\text{Efisiensi Pembakaran } (\eta) = \frac{\text{Konsentrasi CO}_2}{\text{Konsentrasi CO}_2 + \text{Konsentrasi CO}} \times 100\%$$

Selain dari sisi konsentrasi gas buang, efisiensi suatu insenerator juga dilihat dari seberapa seberapa baik panas dari pembakaran digunakan untuk keperluan energi (misal, pemanasan uap) atau yang disebut dengan Efisiensi Termal (*Thermal Efficiency*). Efisiensi termal mengukur seberapa baik panas yang dihasilkan dari pembakaran limbah dimanfaatkan secara optimal, misalnya untuk pemanasan uap atau produksi listrik. Semakin tinggi efisiensi termal, semakin besar kontribusi energi dari proses pembakaran terhadap kebutuhan energi eksternal. Rumus efisiensi termal adalah:

$$\text{Efisiensi termal } (\eta_{\text{termal}}) = \frac{\text{Kalor yang digunakan}}{\text{Kalor total}} \times 100\%$$

Kemudian, efisiensi sebuah insenerator juga dapat dilihat dari mengukur tingkat efektivitas insinerator dalam menghancurkan dan menghilangkan senyawa organik berbahaya, seperti polutan organik persisten (POPs), dioksin, dan furan atau yang dikenal sebagai Destruction and Removal Efficiency (DRE). Standar internasional, seperti yang diterapkan oleh US *Environmental Protection Agency* (USEPA), menetapkan bahwa DRE harus mencapai 99,99% untuk limbah berbahaya. Rumus perhitungan DRE adalah konsentrasi polutan berbahaya sebelum pembakaran, dibandingkan dengan konsentrasi polutan setelah pembakaran atau dapat dituliskan sebagai berikut:

$$RE = \frac{C_{in} - C_o}{C_o} \times 100\%$$

Efisiensi sebuah insenerator juga dapat dilihat dari pengurangan volume dan massa limbah atau yang dikenal juga sebagai *Volume Reduction* (VR) mengukur seberapa efektif insinerator mengurangi volume dan massa limbah padat. Proses ini menghasilkan abu bawah (*bottom ash*) dan abu terbang (*fly ash*). Rumus pengurangan volume dan massa adalah

### **Baku Mutu Udara Ambien**

Emisi yang dihasilkan oleh suatu proses pengolahan mempunyai peraturan untuk menentukan ketentuan dimana diatur dalam Lampiran VIII Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021 Tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup Tentang Baku Mutu Udara Ambien

**Tabel 2.2** Baku Mutu Udara Ambien

Parameter	Beban Maksimum	Satuan
Sulfur Dioksida (SO <sub>2</sub> )	75	µg/m <sup>3</sup>
Karbon Monoksida (CO)	400	µg/m <sup>3</sup>
Nitrogen Dioksida (NO <sub>2</sub> )	65	µg/m <sup>3</sup>
Oksidan fotokimia (O*) sebagai Ozon (O <sub>3</sub> )	100	µg/m <sup>3</sup>
Hidrokarbon Non 3 jam Metana NMHC	160	µg/m <sup>3</sup>
Partikulat debu < 100 µm (TSP)	230	µg/m <sup>3</sup>
Partikulat debu < 10 µm (PM <sub>10</sub> )	75	µg/m <sup>3</sup>
Partikulat debu .2,5 µm (PM <sub>2,5</sub> )	55	µg/m <sup>3</sup>
Timbal (Pb)	2	µg/m <sup>3</sup>

**Sumber: (Peraturan Pemerintah, 2021)**

1. Sulfur Dioksida (SO<sub>2</sub>)  
SO<sub>2</sub> adalah gas beracun yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil yang mengandung sulfur, seperti batu bara dan minyak. Gas ini dapat menyebabkan iritasi pada saluran pernapasan, memperburuk penyakit asma, dan berkontribusi terhadap hujan asam. SO<sub>2</sub> juga dapat bereaksi dengan senyawa lain di atmosfer membentuk partikulat halus (PM<sub>2,5</sub>) yang berbahaya bagi Kesehatan (World Energy Outlook 2024, n.d.).
2. Karbon Monoksida (CO)  
CO adalah gas tidak berwarna dan tidak berbau yang dihasilkan dari pembakaran tidak sempurna bahan bakar fosil. Gas ini sangat berbahaya karena dapat mengikat hemoglobin dalam darah, mengurangi kemampuan darah mengangkut oksigen, dan menyebabkan keracunan bahkan kematian pada konsentrasi tinggi. Sumber utama CO termasuk kendaraan bermotor dan pembakaran sampah.
3. Nitrogen Dioksida (NO<sub>2</sub>)  
NO<sub>2</sub> adalah gas berwarna coklat kemerahan yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar pada suhu tinggi, terutama di kendaraan bermotor dan industri. Gas ini dapat menyebabkan iritasi pada paru-paru, meningkatkan risiko infeksi pernapasan, dan berkontribusi terhadap pembentukan ozon troposferik serta partikulat halus (PM<sub>2,5</sub>) (World Energy Outlook 2024, n.d.).
4. *Oksidan Fotokimia (O) sebagai Ozon (O<sub>3</sub>)\**  
Ozon di permukaan tanah (troposfer) terbentuk dari reaksi fotokimia antara NO<sub>x</sub> dan senyawa organik volatil (VOC) di bawah sinar matahari. Meskipun ozon di stratosfer melindungi bumi dari radiasi UV, ozon di permukaan tanah dapat menyebabkan iritasi mata, batuk, dan memperburuk penyakit pernapasan seperti asma.
5. Hidrokarbon Non-Metana (NMHC)

NMHC adalah senyawa organik yang tidak mengandung metana dan sering dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil, proses industri, dan emisi kendaraan. Senyawa ini berperan dalam pembentukan ozon troposferik dan dapat menyebabkan iritasi pada mata, hidung, dan tenggorokan (DIAS, 2024).

6. Partikulat Debu < 100  $\mu\text{m}$  (TSP)

TSP (*Total Suspended Particulate*) adalah partikulat dengan diameter kurang dari 100 mikrometer yang tersuspensi di udara. Partikulat ini dapat berasal dari debu jalanan, konstruksi, dan aktivitas industri. Meskipun ukurannya relatif besar, TSP masih dapat terhirup dan menyebabkan iritasi saluran pernapasan.

7. Partikulat Debu < 10  $\mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{10}$ )

$\text{PM}_{10}$  adalah partikulat dengan diameter kurang dari 10 mikrometer yang dapat menembus saluran pernapasan bagian atas. Partikulat ini berasal dari pembakaran bahan bakar, debu jalanan, dan aktivitas industri. Paparan jangka panjang terhadap  $\text{PM}_{10}$  dapat menyebabkan penyakit pernapasan dan kardiovaskular (World Energy Outlook 2024, n.d.).

8. Partikulat Debu < 2,5  $\mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{2,5}$ )

$\text{PM}_{2,5}$  adalah partikulat halus dengan diameter kurang dari 2,5 mikrometer yang dapat menembus jauh ke dalam paru-paru dan aliran darah. Partikulat ini dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil, kendaraan bermotor, dan aktivitas industri.  $\text{PM}_{2,5}$  dikaitkan dengan peningkatan risiko penyakit jantung, stroke, dan kanker paru-paru (World Energy Outlook 2024, n.d.).

9. Timbal (Pb)

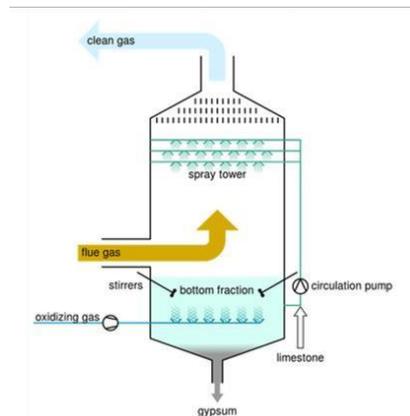
Timbal adalah logam berat beracun yang dilepaskan ke udara melalui pembakaran bahan bakar yang mengandung timbal, proses industri, dan aktivitas pertambangan. Paparan timbal dapat menyebabkan kerusakan sistem saraf, gangguan perkembangan pada anak, dan masalah kesehatan serius lainnya (Rizal, 2024).

### **Pengendalian pencemaran udara dengan *wet scrubbing***

*Incinerator* (tungku pembakaran) digunakan dengan tujuan untuk mengontrol pembakaran sampah secara terbuka, pada dasarnya untuk mengurangi pencemaran udara yang tidak terkontrol; Namun terlepas dari itu, pembakaran sampah kota menghasilkan sejumlah polutan udara termasuk partikulat, Hidrogen klorida, Nitrogen Oksida dan Belerang, Karbon monoksida, hidrokarbon dan sejumlah bahan lainnya. Semua zat tersebut bersifat polutan Ketika pelepasan di atas jumlah tertentu dapat menyebabkan masalah polusi yang serius. (Jude C. Akpe, et al).

Penggunaan tungku Pembakaran dapat mengurangi dampak negatif dari pembakaran di ruang terbuka seperti asap, bau, abu, dan panas yang dihasilkan, serta akan membuka upaya pemanfaatan energi panas hasil pembakaran sampah/limbah tersebut. Meskipun pengendalian pembakaran yang seharusnya dilakukan dengan penggunaan incinerator, pencemaran udara tetap terjadi. Pembakaran Sampah dapat menimbulkan masalah lingkungan, dikarenakan gas buang yang keluar dari cerobong asap, bisa mengandung gas gas yang berbahaya dan beracun, seperti CO, NO<sub>x</sub>, dan dioxin ( Muchlisinalahuddin dkk, 2020)

Sistem penggosok basah (*wet scrubber*) adalah salah satu jenis penggosok yang digunakan untuk menghilangkan bahan berbahaya dari gas buang sisa pembakaran, sebelum dilepas ke lingkungan. Sistem kerja pembersihan dengan menggunakan penggosok basah, adalah dengan menyalurkan gas buang melalui suatu area dan disemprot dengan suatu cairan. Dalam hal penghilangan debu dan partikulat dapat digunakan air, namun bahan kimia lain dapat ditambahkan, apabila akan menghilangkan zat lain yang terkandung pada gas buang. Bahan kimia ini dipilih untuk bereaksi secara khusus dengan kontaminan udara tertentu, umumnya gas asam.



**Gambar 2.3** Prinsip kerja *Wet Scrubber*

Fungsi dari *Scrubber* (pembersih) basah adalah untuk menghilangkan berbagai polutan dari gas buang dari tungku atau perangkat lain. Perangkat ini menggunakan cairan untuk menghilangkan polutan. Gas buang dipindahkan melalui cairan *scrubber* (biasanya melalui ruang) dan cairan dikaburkan melalui gas. Kemudian, gas muncul tanpa kontaminan dan polutan yang ada sebelum terpapar cairan *scrubber*. Ketika gas disemprotkan dengan cairan, polutan yang lebih berat ditarik keluar dari gas dan menempel pada cairan karena komposisi kimianya. Saat gas melewati kabut pembersih, kontaminan tertarik ke kabut dan tertinggal. Meskipun gerimis adalah metode umum untuk membersihkan gas buang dalam wet scrubber, cara lain juga dapat dilakukan dengan mengupayakan gas dalam bentuk gelembung masuk ke dalam genangan cairan sebagai pembersih. Namun, pada prinsipnya bagaimana agar kontaminan terperangkap oleh cairan sebagai pembersih, sehingga gas bersih dapat keluar dari cerobong, dan meninggalkan kontaminan dalam air.

### Jenis Pembersih basah

Menurut Ducan environmental, umumnya terdapat 3 jenis penggosok basah yaitu:

#### 1) *Spray Tower Scrubber* (Penggosok Menara Semprot)

Pembersih menara semprot adalah jenis penggosok basah yang sederhana dan berenergi rendah. Mereka terdiri dari bejana atau menara terbuka dengan nozel semprot untuk mendistribusikan cairan penggosok.

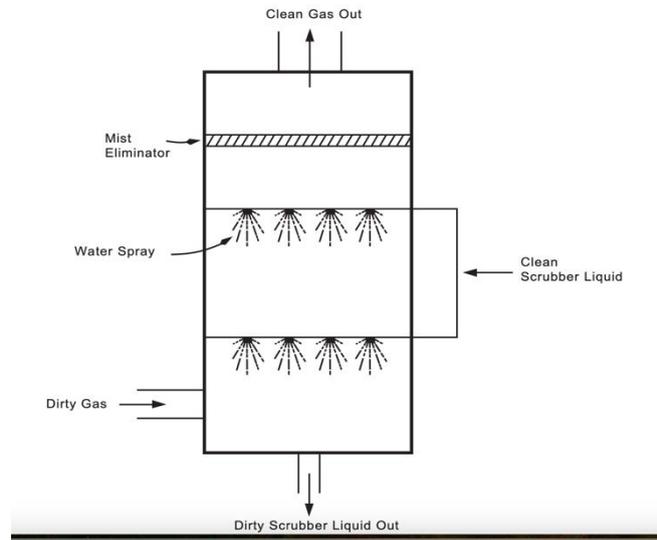
- Gas buang masuk di bagian bawah menara dan mengalir ke atas melalui semprotan cair ke arah arus lawan.
- Cairan pembersih menangkap dan menyerap polutan saat gas melewatinya.
- Materi partikulat dikumpulkan ketika partikel berbenturan dan menempel pada tetesan cairan.

- Menara semprot juga dapat beroperasi dalam pengaturan arus silang dengan aliran gas horizontal. Namun, ini kurang efisien daripada operasi arus balik.

Keuntungan: Desain sederhana, penurunan tekanan rendah, penggunaan energi rendah

Kekurangan: Kurang efisien untuk partikel kecil, potensi bypass gas di sekitar cairan

Aplikasi: Kontrol debu, kabut, dan asap. Penghapusan partikulat.



Gambar 2.3 *Wet scrubber tower sprayer*

## 2) *Venturi scrubbers*

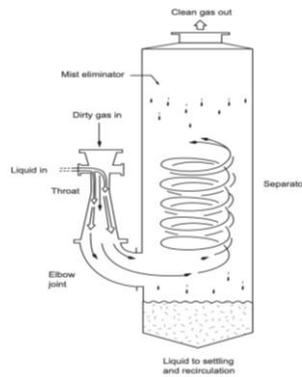
*Venturi Scrubber* menggunakan bagian tenggorokan berkecepatan tinggi untuk mempercepat aliran gas dan memecah cairan penggosok menjadi tetesan yang sangat kecil.

- Aliran gas yang bergerak cepat memasuki bagian konvergen dan berakselerasi menuju tenggorokan yang sempit. Cairan disuntikkan di tenggorokan tegak lurus dengan aliran gas.
- Cairan pecah menjadi tetesan kecil yang mengumpulkan partikel melalui impaksi dan difusi.
- Bagian yang berbeda setelah tenggorokan mengurangi kecepatan gas lagi

Keuntungan: Desain sederhana, penurunan tekanan rendah, penggunaan energi rendah

Kekurangan: Kurang efisien untuk partikel kecil, potensi *bypass* gas di sekitar cairan

Aplikasi: Kontrol debu, kabut, dan asap. Penghapusan partikulat.



Gambar 2.4 Venturi wet scrubber system.

### 3) Packed-bed scrubbers

*Packed-bed scrubber* yang berisi bahan kemasan berlapis di dalam ruang scrubber yang menyediakan area permukaan untuk kontak gas-cairan. Bahan kemasan dapat berupa berbagai bentuk seperti cincin, pelana, atau lembaran terstruktur. Bahan kemasan menciptakan area permukaan yang besar bagi gas untuk menyentuh cairan yang mengalir melaluinya. Cairan melapisi kemasan dan membentuk lapisan tipis untuk penyerapan polutan. Aliran gas mengalir secara vertikal ke atas melalui pengepakan dalam aliran arus lawan.

Keuntungan: Efisiensi penurunan kontaminan tinggi, penurunan tekanan sedang, persyaratan ruang yang lebih kecil

Kekurangan: Terbatas pada beban debu yang rendah, potensi penyumbatan dan penyaluran

Aplikasi: Pengendalian gas dan asap anorganik, penghilangan VOC, penghilangan beberapa partikulat

### Cara Kerja Wet Scrubber

*Wet Scrubber* beroperasi dengan mengalirkan gas buang yang terkontaminasi melalui media cair yang menghilangkan polutan. Ada beberapa metode berbeda kontak gas-cair ini terjadi:

- Metode penyemprotan yang paling umum adalah menyemprotkan gas buang dengan cairan penggosok saat melewati ruang penggosok.
- Cairan dikaburkan dan ditaburkan ke gas dari nozel di atas.
- Cairan pembersih biasanya berupa air yang efektif menghilangkan debu partikulat
- Bahan kimia dapat ditambahkan ke cairan pembersih untuk membantu menertralkan gas asam.
- Saat gas buang melewati kabut cair, polutan bertabrakan dan menempel pada tetesan yang menyebabkannya dikeluarkan dari aliran gas

### Pengolahan air menggunakan Koagulan Alami

Koagulan alami telah digunakan secara luas dalam pengolahan air untuk mengurangi kekeruhan, kandungan bahan organik, dan parameter pencemaran lainnya. Bahan-bahan seperti biji kelor, serbuk biji flamboyan, dan polisakarida dari limbah buah-buahan menunjukkan potensi besar sebagai alternatif yang ramah lingkungan dibandingkan koagulan kimia konvensional.

Biji kelor mengandung protein kationik yang efektif mengurangi *Biochemical Oxygen Demand* (BOD), *Chemical Oxygen Demand* (COD), dan *Total Suspended Solids* (TSS) pada air limbah. Penelitian menunjukkan bahwa dosis optimal dapat memberikan efisiensi tinggi dalam pengurangan parameter tersebut meskipun kadang perlu disesuaikan untuk memenuhi standar lingkungan yang berlaku (Setyawati et al., 2018). Kelor (*Moringa oleifera*) termasuk dalam famili *Moringaceae* merupakan jenis tumbuhan perdu (milik tumbuhan tingkat tinggi) dengan tinggi batang 7 sampai 11 meter, batang lunak dan rapuh dan daunnya seujung jari dengan berbentuk bulat telur. Kelor merupakan jenis tanaman yang dapat tumbuh dari dataran rendah hingga 700 meter di atas permukaan laut.

Biji kelor dapat digunakan sebagai alternatif koagulan alami yang tersedia secara lokal. Biji kelor yang digunakan yaitu yang sudah matang atau tua dan memiliki kadar air kurang dari 10%. (Riko, 2013). Zat aktif yang terdapat pada biji kelor adalah (4 Alfa-4-Ramnosiloksi-Benzil-Isotiosianat) yang dapat menyerap partikel air limbah. Dengan mengubah bentuk menjadi lebih kecil, bahan aktif dalam biji kelor semakin banyak seiring dengan bertambahnya luas permukaan biji kelor. Bila kadar air biji kelor tinggi maka kemampuannya menyerap limbah cair lebih rendah karena bahan aktifnya tidak berada di permukaan biji kelor melainkan tertutup air, sehingga kadar air biji kelor harus rendah.

Serbuk biji kelor mempunyai pengaruh yang kecil terhadap keasaman dan konduktivitas dalam proses koagulasinya. Protein kationik yang larut dalam air merupakan bahan koagulan di dalam serbuk biji kelor. Serbuk biji kelor merupakan campuran yang kompleks dan heterogen, namun saat dicampur dengan air protein terlarutnya mempunyai muatan positif. Hal tersebut sangat menguntungkan karena mayoritas koloid yang ada di Indonesia adalah bermuatan listrik negatif akibat bersumber dari material organik. Ion koagulan dengan muatan yang berbeda dengan muatan koloidnya akan ditarik dan sebaliknya.

Prinsip perbedaan muatan tersebut yang akan menjadi dasar dari proses koagulasi. Semakin tingginya ion yang berbeda muatan maka akan semakin cepat terjadinya koagulasi. Keuntungan menggunakan koagulan alami seperti bubuk biji kelor adalah tanaman ini mudah ditemukan di daerah iklim tropis dan anti bakteri. Selain itu, koagulan alami dapat membentuk flok yang lebih anti gesekan daripada koagulan kimia dalam aliran turbulen.

Selain itu, serbuk biji flamboyan (*Delonix regia*) juga terbukti efektif dalam menurunkan kekeruhan air. Komponen bioaktif seperti tanin dan polisakarida yang ada dalam bahan ini mampu membentuk flok dengan partikel koloid, mempermudah proses sedimentasi. Penelitian lain menunjukkan bahwa limbah buah-buahan, seperti kulit pisang dan biji nangka, dapat dimanfaatkan karena kandungan polisakaridanya yang mendukung proses pengendapan kotoran (Judith et al., 2021)

Penggunaan koagulan alami tidak hanya mendukung upaya pengelolaan limbah tetapi juga lebih berkelanjutan secara ekonomi dan ekologis, terutama untuk aplikasi di daerah dengan keterbatasan akses terhadap bahan kimia industri (Aziz et al., 2015). Pendekatan ini juga relevan dalam topik penelitian terkait *wet scrubber* untuk pembakaran sampah, karena koagulan alami dapat digunakan dalam proses pengolahan air limbah atau untuk menangani limbah cair yang dihasilkan.



## BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1. Waktu dan Tempat Penelitian

Waktu penelitian ini mulai dari bulan Desember 2024 - Juli 2025. Lokasi penelitian bertempat di Kawasan *Teaching Factory* Kampus Usakti Desa Nagrak, Kecamatan Gunung Putri, Kabupaten Bogor dan di Laboratorium Lingkungan, Jurusan Teknik Lingkungan, Universitas Trisakti. Pengambilan sampel dan preparasi sampel sampah dilakukan di Kawasan *Teaching Factory* Universitas Trisakti Desa Nagrak, Kabupaten Bogor. Pada penelitian ini juga dilakukan pengujian terhadap asap yang keluar dari cerobong dan yang dilakukan di kawasan *Teaching Factory waste to value* Universitas Trisakti Desa Nagrak, Kabupaten Bogor.

### 3.2. Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan secara eksperimental, yaitu penelitian yang berusaha mencari pengaruh variabel tertentu terhadap variabel lain dengan kontrol yang ketat. Penelitian dilakukan menjadi 2 fokus yaitu; 1. pengaruh jumlah air pencuci terhadap kualitas gas buang yang diolah dengan *wet scrubber*. Dan 2 Pengolahan air bekas pencuci gas buang pembakaran sampah menggunakan metode Jarrest, dengan tambahan koagulan alami biji kelor.

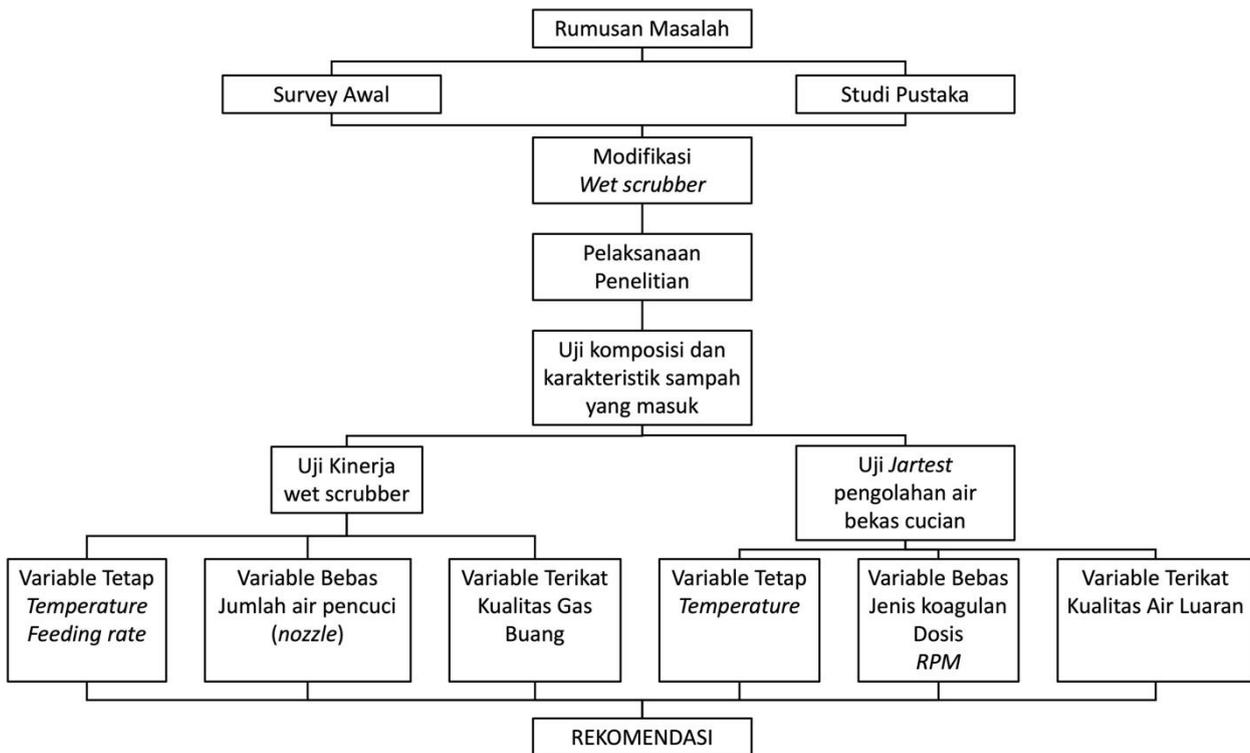
### 3.3. Metode Analisis

Metode analisis yang digunakan adalah *Spectrophotometer*, *Atomic Absorbance Spectrophotometer*, *Gas Chromatography*, *Turbidimetry*, dan *Gravimetry*. Adapun Alur Penelitian, dan Variabel-variabel yang akan digunakan adalah sebagai berikut pada gambar 3.1.

### 3.4. Indikator Capaian Penelitian

Penelitian pendahuluan ini, dilakukan dengan tujuan mengetahui komposisi dan jumlah sampah yang masuk ke lokasi pengolahan sampah di *teaching factory* olah sampah (TPS). Adapun tahapan kerja yang dilakukan pada uji komposisi ini mengikuti SNI 19-3694-1994, dengan tahapan sebagai berikut :

- Total kendaraan yang masuk ke TPS ada 10 kendaraan *pick up* jenis Suzuki/Daihatsu, dan 4 *dump truck* kapasitas 8 m<sup>3</sup>. Diambil sample 1 kendaraan *pickup* dan 1 *dump truck*, dan dilakukan pengamatan selama 7 hari.
- Penentuan Volume Bak mobil *pick up* dan *dump truck* dilakukan dengan cara mengukur Panjang, lebar dan tinggi, masing masing bak.



**Gambar 3. 1.** Alur Penelitian

Penentuan Berat jenis sampah, dilakukan dengan melakukan sampling pada beberapa titik timbunan sampah saat selesai unloading sampah dari kendaraan pick up maupun truk sampah, dengan tahapan sebagai berikut:

- Tunggu kendaraan sampai selesai menurunkan sampahnya
- Tentukan titik sampling sampah yang akan diambil sampelnya
- Ambil sampel sampah dari bagian atas bawah dan tengah tumpukan sampah, dan masukkan ke dalam keranjang plastik yang sudah diukur dimensinya sebelumnya.
- Padatkan isi keranjang plastik dan hentak 3-5 kali, agar isi keranjang padat.
- Lakukan penimbangan keranjang dalam keadaan isi sampah, maupun kosong.
- Lakukan 3 kali pengulangan.
- Berat jenis dihitung dengan rumus  $BJ = \frac{\text{berat sampah } kg}{\text{volume keranjang } m^3}$
- Penentuan komposisi sampah dan prosentasi sampah yang masuk ke inserator
- Berat Sampah yang masuk ke TPS dihitung dari Berat sampah =  $10(BJa * Vola) + 4 (BJb * Vol b) = \text{Berat Total Sampah masuk Kg}$

BJa : berat jenis sampah pada mobil *pick up*

BJb : berat jenis sampah pada *dump truck*

Vola : Volume bak *Pick up*

Volb : Volume bak *dump truck*

Pada kegiatan di TPS ada 3 jenis peruntukan sampah, yaitu, sampah valuable, yaitu sampah yang masih punya nilai ekonomi dan dapat dijual langsung seperti botol dan gelas plastic,

sampah sebagai bahan baku rdf, dan sampah residu yang dapat dibakar pada unit incinerator, seperti kain, kayu dan ranting.

Penentuan jenis dan komposisi sampah dilakukan dengan melakukan pengamatan pada saat Pengolahan sampah beroperasi, petugas melakukan pemilahan sampah valuable dan sampah residu, sedang sampah yang masuk ke mesin cacah adalah sampah yang menjadi bahan baku RDF.

Sampah valuable di timbang, dan sampah residu ditimbang, maka sampah sebagai bahan baku rdf dihitung dengan persamaan :  $D = \text{Totoal berat sampah yang masuk} - B - C - I$

D : sampah bahan baku rdf

B : sampah valuable

C : sampah residu

i : sampah inert (kaca dan karet)

### 3.3.2. Penelitian inti

Ada dua penelitian inti disini yaitu :

1) Pengaruh jumlah air pencuci terhadap penurunan polutan gas buang

#### Variabel Tetap:

- Temperatur pembakaran
- Jenis sampah yang dibakar

#### Variabel Bebas:

- Jumlah air pencuci

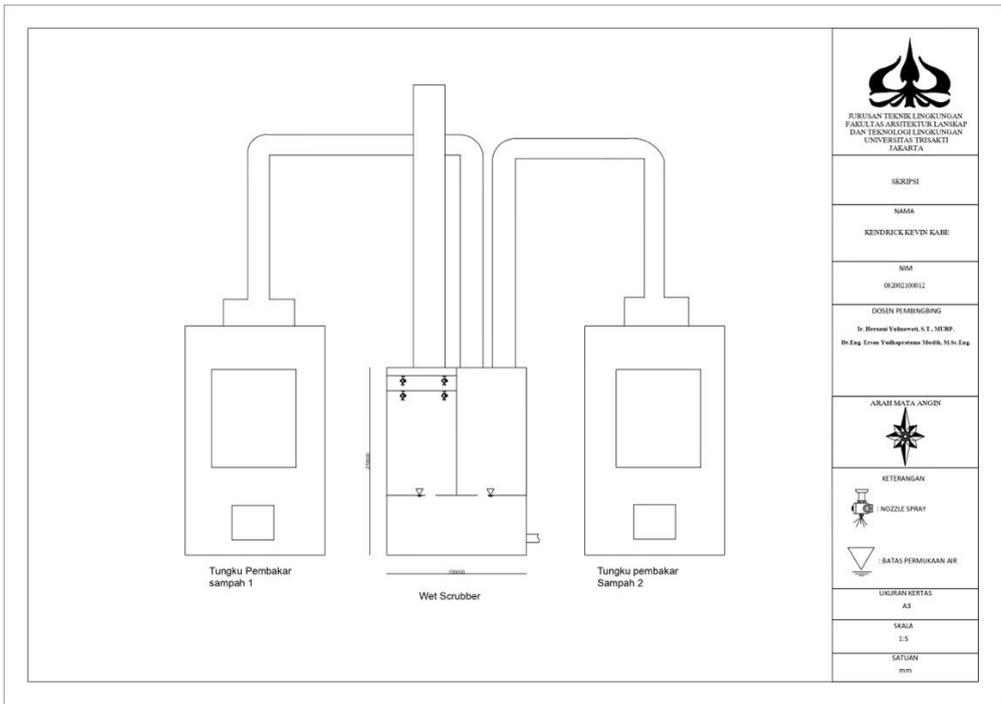
#### Variabel terikat

- CO<sub>2</sub>, CO, NH<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, Partikulat

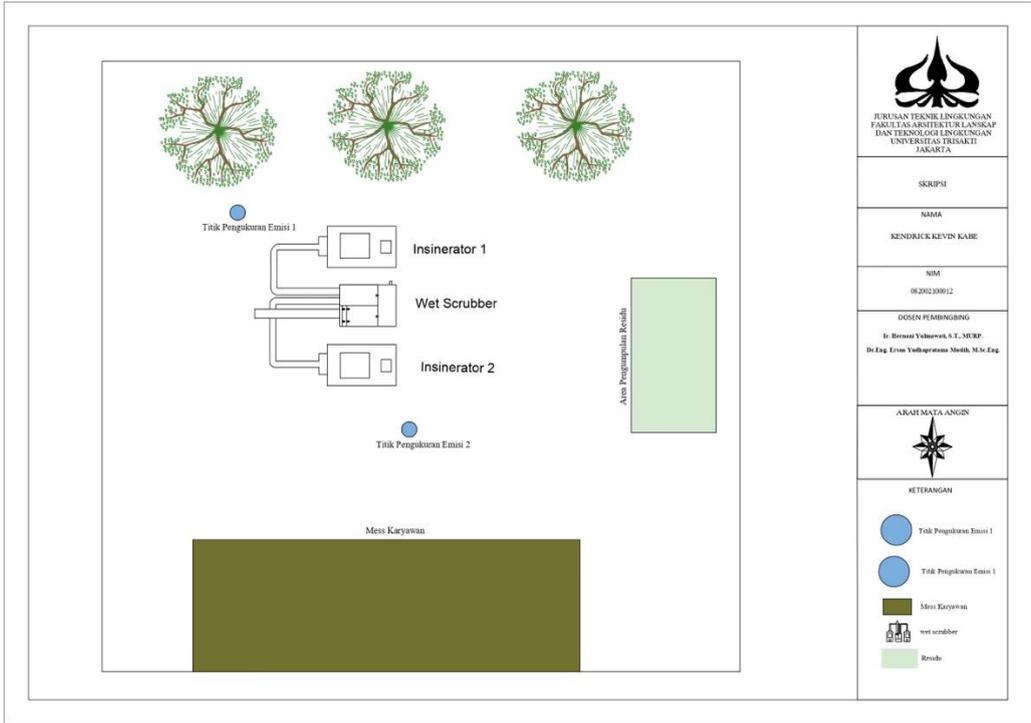
2) Pengaruh dosis koagulan alami terhadap penurunan polutan air bekas pencuci

- Variable Tetap : temperatur pembakaran
- Variable Bebas : Dosis koagulan alami
- Variabl Terikat : Kandungan TAR, TDS, TSS, COD, Fe, Pb, pH, Kekeruhan

#### Desain Insenerator:



Gambar 3.2. Desain insenerator yang digunakan



Gambar 3.3. Tampak atas Insenerator dan Titik Sampling

**Standar Baku Mutu Udara Ambien dan Standar Baku Mutu Insinerasi**

Baku mutu udara ambien digunakan sebagai acuan dalam mengevaluasi konsentrasi pencemar udara yang dihasilkan pada area insinerator. Alat 2 (*gasdetector*) yang berlawanan arah angin atau tidak terkena emisi akan mengukur udara ambien di sekitar fasilitas insinerator *Teaching Factory Waste to Value*. Standar ini mengacu pada Peraturan Pemerintah No 22 Tahun 2021.

**Tabel 3.4** Standar Baku Mutu Udara Ambien

Parameter	Baku mutu	Satuan
Sulfur Dioksida (SO <sub>2</sub> )	150	μg/m <sup>3</sup>
Karbon Monoksida (CO)	10.000	μg/m <sup>3</sup>
Nitrogen Dioksida (NO <sub>2</sub> )	65	μg/m <sup>3</sup>
PM <sub>2.5</sub>	55	μg/m <sup>3</sup>

Sumber: PP No 22 Tahun 2021, Lampiran VII

**Tabel 3.5** Standar Baku Mutu Insinerasi

Parameter	Baku Mutu	Satuan
PM <sub>2.5</sub>	55	μg/m <sup>3</sup>
CO	100	ppm
Suhu Minimum Pembakaran	850	<sup>0</sup> C

Sumber: PP No 22 Tahun 2021, Lampiran VIII

Sebagai catatan bahwa gas Karbon Dioksida (CO<sub>2</sub>) pada Lampiran VIII Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021 tentang baku mutu emisi dari kegiatan insinerasi, tidak termasuk dalam daftar parameter yang memiliki ambang batas konsentrasi. Hal ini terjadi karena tidak penting, namun karena secara regulasi, CO<sub>2</sub> dikategorikan sebagai gas rumah kaca (GRK) dan bukan sebagai polutan local berbahaya langsung terhadap kesehatan manusia pada paparan jangka pendek.

CO<sub>2</sub> adalah sebagai hasil utama pembakaran sempurna bahan organik dan bersifat *non-toksik* pada konsentrasi normal di udara. Akan tetapi emisi CO<sub>2</sub> adalah gas yang berkontribusi terhadap pemanasan global, sehingga memiliki dampak bersifat global dan jangka panjang, oleh karena itu pengelolaannya diatur dalam kerangka yang berbeda

### Penambahan *Nozzle* pada *Wet scrubbing*

Untuk mendapatkan penurunan emisi yang optimal, modifikasi *wet scrubber* yang dilakukan adalah dengan memasang *nozzle* yang jumlahnya ditambah secara bertahap (0-4 *nozzle*). Adapun komponen utama

*wet scrubber* terdiri dari:

- *Tower scrubbing*, tempat gas buang dan air berkontak .
- *Nozzle*, menyemprotkan air di *wet scrubber*
- Pompa, untuk mengalirkan air dari tangki toren ke *nozzle*.
- Cerobong, ruang keluar emisi setelah pencucian.

Perhitungan *spray velocity* dilakukan untuk mengevaluasi efisiensi penyemprotan:

$$v \text{ spray} = \frac{Q \text{ liquid}}{A \text{ nozzle}}$$

Keterangan:

- *Vspray*: Kecepatan semprotan air (m/s)
- *Qliquid*: Debit air (m<sup>3</sup>/s)
- *Anozzle*: Luas penampang *nozzle* (m<sup>2</sup>)

*Wet Scrubber* yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan system penyemprotan berbasis *nozzle*. Spesifikasi *nozzle* sangat mempengaruhi efisiensi penangkapan gas dan partikulat. Spesifikasi *nozzle* disajikan pada **Tabel 3.6.** dan gambar *nozzle* dapat dilihat pada **gambar 3.6**

**Tabel 3.6** Spesifikasi *Nozzle*

<b>Jenis <i>Nozzle</i></b>	<b><i>Sprayer konikal (full cone)</i></b>
Diameter lubang	±5 mm
Debit (Q)	±0,0005 m <sup>3</sup> /s
Tekanan Operasi	3 Bar
Jumlah <i>Nozzle</i>	0,1,2,3, dan 4 <i>Nozzle</i>
Ukuran <i>Droplet</i>	±100–200 mikron
Kecepatan <i>Spray</i>	±24,5 m/s (dihitung dengan rumus $v=Q/A$ )

### **3.5. Indikator Capaian Penelitian**

HKI, Artikel ilmiah, Bahan ajar, dan Porotype

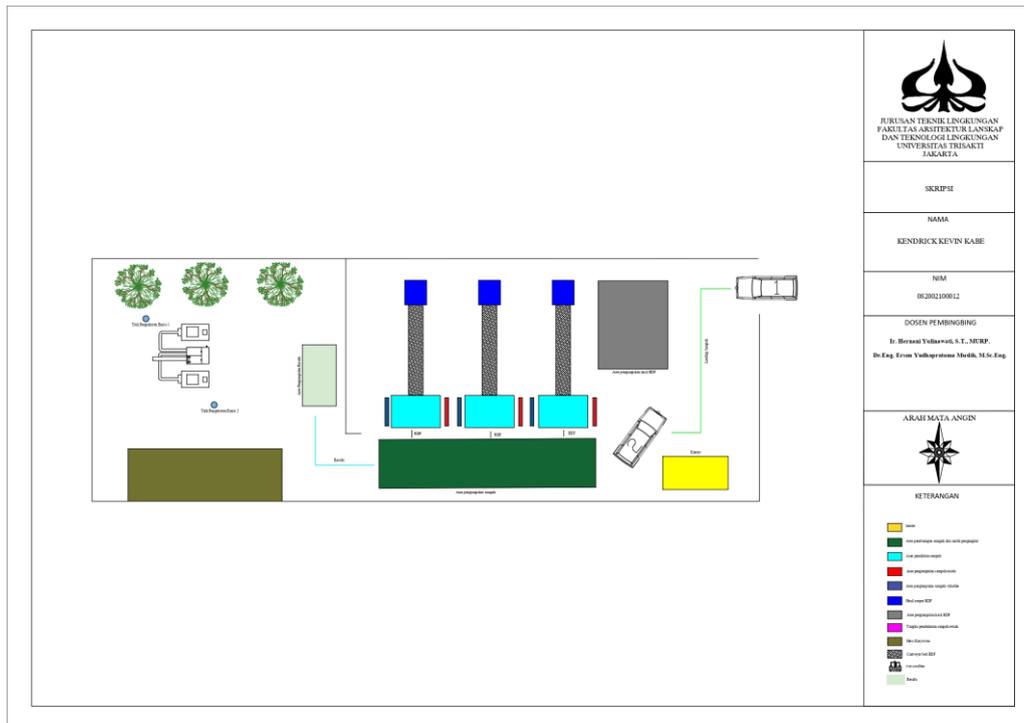
## BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Kegiatan Pengolahan Sampah di TPS Trisakti

Kegiatan Pengolahan Sampah pada Teaching factory waste to Value (TPS), meliputi :

1. Penerimaan sampah dari pemukiman, menggunakan mobil pick up sebanyak 10 mobil dan sampah dari ITC menggunakan Dump truck sebanyak 3 mobil.
2. Pemilahan sampah semi mekanis, artinya sampah di letakan di *conveyer* (ban berjalan), tenaga kerja melakukan pemilahn dengan mengambil sampah valuble dan residu, sedangkan sampah yang masuk kemesin pencacah adalah sampah untuk bahan baku RDF.
3. Mesin pencacah (*shredder*) yang digunakan jenis mesin Gibrix, yang mampu memisahkan bahan basah turun kebawah dan sampah kering tertiuup keatas, dan masuk ke mesin pencacah berikutnya.
4. Sampah basah yang sudah dicacah seyogyanya dikeringkan terlebih dahulu sebelum masuk ke tempat penampungan rdf, sedangkan sampah ringan/kering yang sudah dicacah, dikirim dengan *coveyor* ketempat penampungan drf.
5. Sampah residu dipilah lagi menjadi 2 macam, yaitu R1 sebagai bahan asupan insinerasi, dan R2 bahan inert, berupa botol beling.

Pada gambar 4.1 dapat dilihat diagram alir peroses pengolahan sampah di TPS



**Gambar 4.1** Lay out Tempat Pengolahan Sampah Teaching Factory waste to Value

### 4.2 Jumlah dan komposisi Sampah masuk TPS

Dari hasil pengamatan di lapangan diperoleh data rata rata mobil sampah yang masuk adalah mobil pick up dengan kapasitas 5,4 m<sup>3</sup> sebanyak 10 kendaraan dan dump truck dengan kapasitas 16, 3 m<sup>3</sup> sebanyak 3 kendaraan. Penentuan berat jenis sampah dari pemukiman (menggunakan alat angkut mobil pick up) dan berat jenis sampah dari ITC (menggunakan alat angkut mobil dump truck) sebanyak

3 kendaraan setiap hari nya. Penentuan berat jenis sampah tersebut menggunakan acuan SNI 19-3964-1994 dengan menggunakan keranjang plastik ukuran 0,143 m<sup>3</sup>, dengan jumlah sampel sebanyak 3 titik setiap kendaraan dan dilakukan selama 7 hari. Pada Tabel 4.1 dapat dilihat berat jenis sampah dari pemukiman dan berat jenis sampah dari ITC.

**Tabel 4.1** Jumlah Sampah yang masuk TPS Trisakti

hari	Sampah dari Pick up			Sampah dari Truk		
	BJ (kg/m <sup>3</sup> )	(kg/hari/mbl)	Total (kg/hari)	BJ (kg/m <sup>3</sup> )	(kg/hari/mbl)	Total (kg/hari)
Senin	212	1.146	11.458	236	3.856	11.568
Selasa	282	1.525	15.252	220	3.582	10.747
Rabu	183	988	9.877	191	3.115	9.346
Kamis	265	1.432	14.322	217	3.546	10.637
Jum'at	213	1.150	11.505	265	4.319	12.958
Sabtu	229	1.240	12.397	288	4.706	14.119
Minggu	241	1.302	13.016	215	3.507	10.520
<b>rata 2</b>	<b>232,00</b>	<b>1.255</b>	<b>12.547</b>	<b>233,19</b>	<b>3.805</b>	<b>11.414</b>

Jumlah sampah yang masuk di TPS Trisakti adalah sebanyak 23.961 kg/hari. yang terdiri dari 12.547 kg/hari dari permukiman desa Ciangsana dan Desa Nagrak, ditambah 11.414 kg/hari ( 3 truk) dari ITC.

Penelitian komposisi sampah dilakukan dengan pengamatan salah satu mobil sampah pick up dari pemukiman dan mobil truk sampah dari ITC, sampah yang sudah di tuang di tempat yang sudah ditentukan, pemilahan sampah dilakukan oleh petugas pemilah, untuk memisahkan sampah anorganik valuable, sampah yang tidak dapat masuk ke mesin pencacah (sampah residu). Pengamatan dilakukan selama 7 hari berturut turut, dari hasil pengamatan diperoleh data bahwa sampah katagori residu yang masuk ke unit pembakaran adalah sampah yang dapat dibakar, namun tidak dapat dicacah pada mesin pencacah, yaitu jenis sampah tali plastic, tas jenis spunbond, kain dan kayu. Jumlah sampah tersebut berkisar 450-524 kg/hari. Berdasarkan hasil penelitian Ulfa dkk, 2021 komposisi sampah di kecamatan Gunung Putri Kabupaten Bogor, meliputi sampah organik (57,3%), plastik (14,8), kertas (11,2%), dan sisanya berupa logam, tekstil, serta sampah lainnya.

Dilihat dari jenis sampah yang masuk ke unit pembakaran tersebut, maka jenis Sampah tersebut cenderung menghasilkan emisi gas seperti CO<sub>2</sub>, CO, dan PM<sub>2.5</sub> yang tinggi, sehingga mempengaruhi strategi pengendalian emisi. Berikut adalah ringkasan jenis sampah dan potensi emisi pada **Tabel 4.2**.

**Tabel 4.2 Jenis Sampah dan Emisi**

Jenis Sampah	Sumber emisi
Sampah Organik	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , partikulat halus (PM <sub>2.5</sub> ), senyawa organik volatil (VOC)
Sampah Plastik	CO <sub>2</sub> , HCl, dioksin, furan, PM <sub>2.5</sub>
Sampah Kertas dan karton	CO <sub>2</sub> , PM <sub>2.5</sub> , NO <sub>x</sub>
Sampah Tekstil	CO <sub>2</sub> , PM <sub>2.5</sub> , VOC
Sampah kayu dan limbah hijau	CO <sub>2</sub> , PM <sub>2.5</sub> , VOC

**Sumber:** Ulfa. dkk (2021), diadaptasi dari KLHK (2020)

#### 4.3 Kinerja Unit Insinerasi

Hasil pengamatan pada unit pembakaran diperoleh data bahwa jumlah sampah yang masuk ke unit insinerasi sebanyak 25 kg/batch, dengan waktu pembakaran selama 1 jam 30 menit, pada temperature pembakaran berkisar antara 350-400°C. Berdasarkan literatur berat jenis sampah non kompak diperoleh 100-150 kg/m<sup>3</sup>, maka dapat dihitung Volume ruang pembakaran adalah sebagai berikut:

$$\text{Volume ruang bakar(m}^3\text{)} = \frac{\text{berat sampah (kg)}}{\text{Densitas } \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)}$$

$$\text{Volume ruang bakar(m}^3\text{)} = 25/150 = 0,167 \text{ m}^3$$

Sistem pembakaran merupakan batch system tanpa memerlukan bahan bakar tambahan selain sampah itu sendiri. Berdasarkan karakteristik sampah residu yang digunakan terdiri atas bahan mudah terbakar seperti kayu, tekstil, bahan spunbond dan plastik, yang mana umumnya memiliki nilai kalor di atas 15 MJ/kg. Hal ini sesuai dengan standar minimum efisiensi insinerator skala kecil (Budiman & Wibowo, 2023). Selanjutnya Mariatunnikmah et al. (2024) juga menunjukkan bahwa nilai kalor residu di musim kemarau dapat mencapai 20,67 MJ/kg, cukup untuk memastikan efisiensi termal pada proses insinerasi.

Salah satu tujuan mengolah residu sebagai bahan bakar adalah mendukung program zero waste to landfill. Selain itu, komposisi residu yang tinggi terhadap material karbon seperti plastik dan tekstil menghasilkan emisi yang signifikan, terutama PM<sub>2.5</sub> dan CO<sub>2</sub> (Putra & Dewi, 2021).

#### 4.4 Kinerja Sistem wet Scrubber

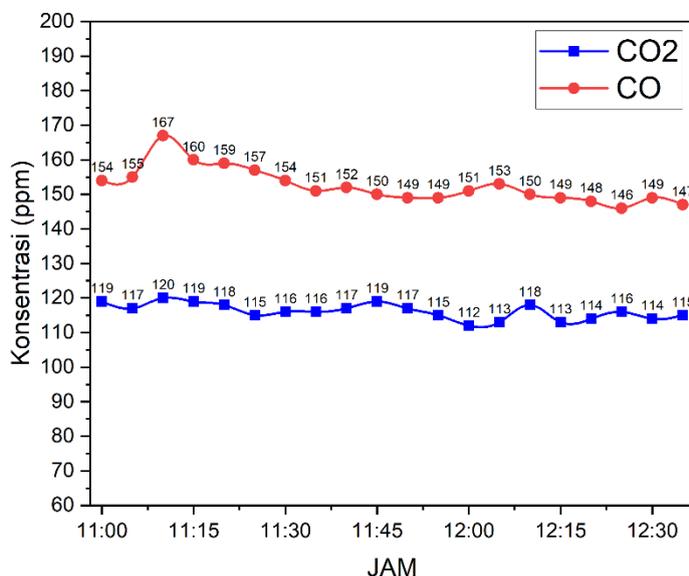
Pada penelitian ini gas buang hasil pembakaran, sebelum dilepas ke udara, dilakukan pembersihan terlebih dahulu, dengan menggunakan pembersih basah (wet scrubber). Oleh karena itu parameter PM<sub>2.5</sub>, CO dan CO<sub>2</sub> menjadi fokus evaluasi efektivitas sistem *wet scrubber* karena berhubungan langsung dengan kualitas pembakaran dan kemampuan wet scrubber sistem dalam menyerap pencemar.

Variasi jumlah *nozzle* pada *wet scrubber* merupakan salah satu variable penting dalam penelitian ini untuk mengevaluasi pengaruhnya terhadap penurunan emisi dari hasil pembakaran insinerator. *Wet scrubber* bekerja dengan menyemprotkan air melalui *nozzle* sehingga partikel dan gas yang terkandung dalam aliran gas buang dapat terserap atau terjebak dalam *droplet* air. Semakin banyak jumlah *nozzle*, maka semakin luas permukaan kontak antara semprotan air dan gas buang, yang berdampak pada peningkatan efisiensi penangkapan emisi seperti PM<sub>2.5</sub>, CO dan CO<sub>2</sub>.

Hasil pengamatan pada konsentrasi PM<sub>2.5</sub>, CO dan CO<sub>2</sub> setelah aliran gas melewati unit *wet scrubber*, menunjukkan penurunan. Dengan bertambahnya jumlah *nozzle*, maka luas permukaan kontak antara gas buang dan air meningkat, sehingga berpengaruh pada peningkatan efisiensi pemperangkap polutan. Dengan bertambahnya jumlah *nozzle* juga akan semakin besar turbulensi dan penyebaran semprotan air di dalam kolom *scrubber*, sehingga efektivitas penyerapan partikel dan gas semakin meningkat. Darmawan et al. (2023), dalam penelitiannya menyatakan bahwa penggunaan konfigurasi *multi-nozzle* dalam *wet scrubber* dapat meningkatkan efisiensi penurunan PM<sub>2.5</sub> hingga lebih dari 60% pada sistem skala kecil.

Kemampuan *wet scrubber* dalam memerangkap polutan, juga sangat dipengaruhi oleh karakteristik semprotan air, termasuk ukuran *droplet*, tekanan semprot, dan kecepatan percikan. Dalam kondisi optimal, kombinasi jumlah *nozzle* dan tekanan semprot yang memadai akan menghasilkan distribusi semprotan yang merata, sehingga interaksi antara fasa gas dan air lebih maksimal. Seperti telah dijelaskan Surya dan Laksono (2022), bahwa *wet scrubber* yang dilengkapi dengan *nozzle* bertekanan tinggi yang menghasilkan *droplet* kecil dan merata di ruang penyemprotan dapat meningkatkan efisiensi pemerangkapan partikulat secara signifikan. Penerapan *wet scrubber* dalam penelitian ini terbukti mampu menurunkan tingkat emisi PM<sub>2.5</sub> dan CO<sub>2</sub> maupun CO yang dihasilkan dari pembakaran sampah residu. Penurunan konsentrasi PM<sub>2.5</sub> mencapai lebih dari 50% dan CO<sub>2</sub> mengalami penurunan moderat sebesar 10–15% pada penggunaan 4 *nozzle*, merupakan penurunan polutan tertinggi. Temuan ini menunjukkan bahwa desain sistem pengendali emisi, khususnya jumlah dan karakteristik *nozzle*, berperan penting dalam mendukung proses pembakaran yang lebih ramah lingkungan.

Pengamatan gas buang dilakukan setiap 5 menit sekali, selama unit insinerasi beroperasi, dalam kurun waktu 1 minggu berturut turut, terhadap parameter PM 2,5; CO<sub>2</sub> dan CO Hasil pengamatan terhadap emisi gas buang dengan variasi tanpa nozzle, 1 nozzle, 2 nozzle, dan 4 nozzle dapat dilihat pada Tabel 4.3 dan gambar 4.3a, 4.3b, 4.3c.

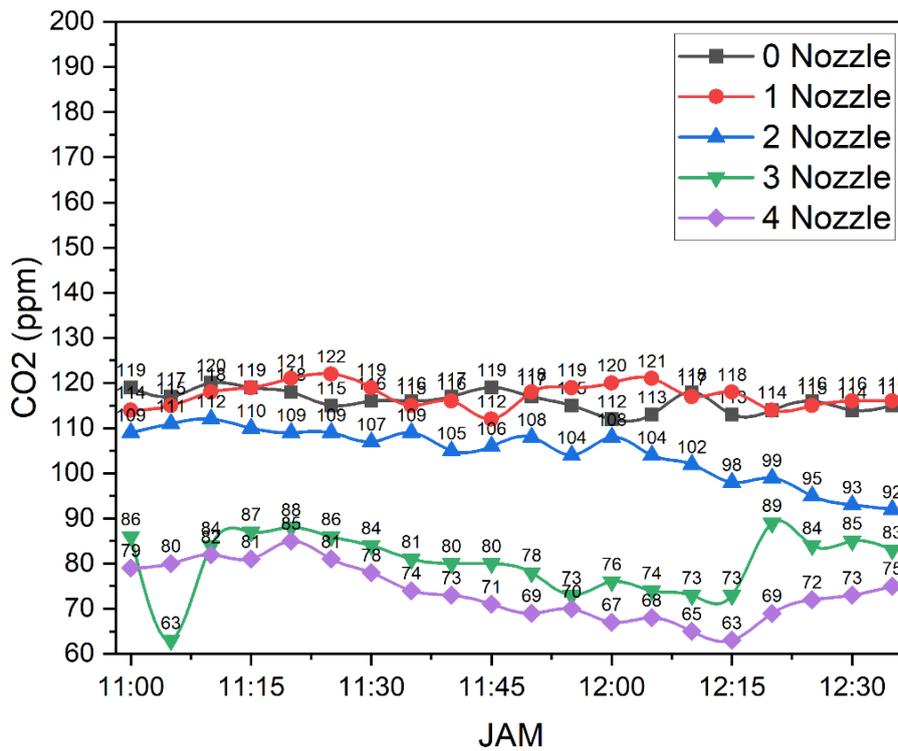
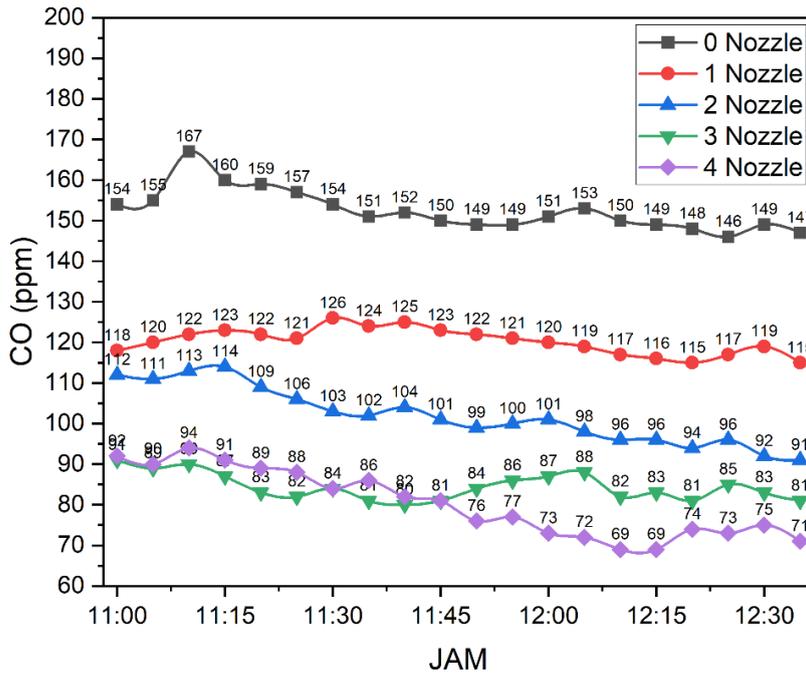


**Gambar 4.3a** Grafik Konsentrasi CO dan CO<sub>2</sub> pada Gas buang kondisi tanpa Nozzle

Pada kondisi existing dimana tidak ada penambahan penyemprotan air dari nozzle. Sehingga tidak terjadi kontak gas buang dengan air pembersih, oleh karena itu dapat dilihat bahwa emisi CO berkisar paada 154-147 ppm (176.000-168.000 µg/m<sup>3</sup>); emisiss CO<sub>2</sub> berkisar pada 120-129 ppm (125.510-231.673 µg/m<sup>3</sup>). Sedangkan nilai emisi yang diperbolehkan adalah untuk kadar CO 10.000 µg/m<sup>3</sup>, dari data tersebut, menunjukkan bahwa konsentrasi CO dan CO<sub>2</sub> sangat tinggi, karena pengaruh dari emisi gas buang pembakaran sampah residu. Serti telah dibahas sebelumnya bahwa Gas CO<sub>2</sub> tidak termasuk dalam gas berbahaya, akan tetapi gas CO<sub>2</sub> termasuk gas rumah kaca. Oleh karena itu diperlukan upaya pembersihan gas buang, dengan melakukan penyemprotan dan memungkinkan kontak dengan gas buang lebih baik lagi, maka dalam penelitian ini dipasang penambahan *nozzle* di tengah bak *wet scrubber*.

**Gambar 4.3b.** Grafik Pengaruh penambahan Nozle terhadap konsentrasi CO dan CO<sub>2</sub> pada gas buang

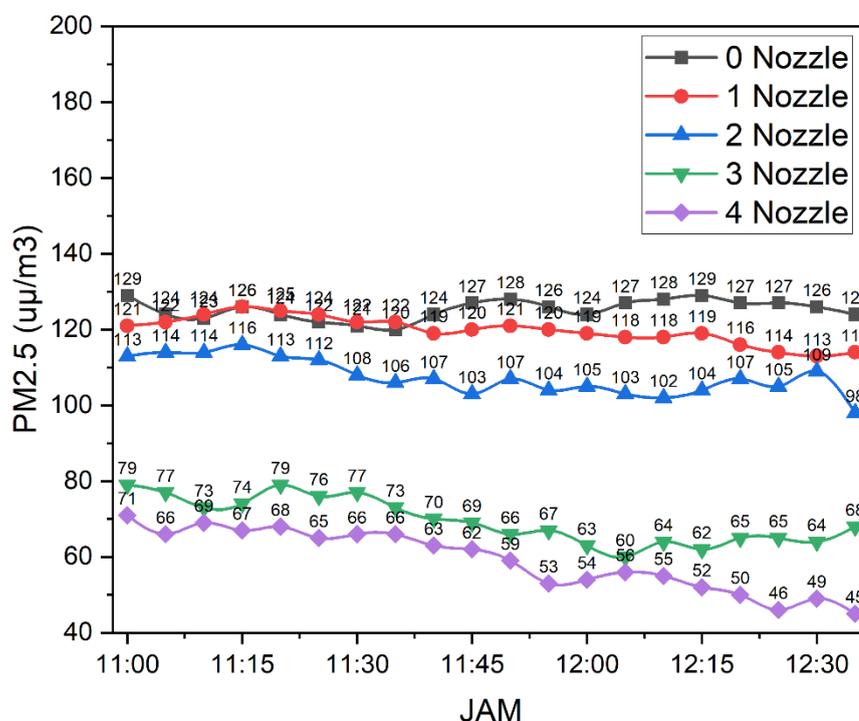
Pada Gambar 4.3.b terlihat saat tanpa pemnambahan nozzle kadar CO berkisar pada 147-154 ppm (168.000-176.000 µg/m<sup>3</sup>), dan terjadi penurunan setelah dilakukan penyemprotan dengan 1 nozle kadar CO turun dari 115-118 ppm (131.429-134.857 µg/m<sup>3</sup>), kemudian konsentrasi CO turun menjadi 91-112 (104.000-128.000 µg/m<sup>3</sup>) pada penyemprotan dengan 2 nozzle, selanjutnya konestrasii CO menjadi 81-92 (82.751-104.000 µg/m<sup>3</sup>) pada penyemrotan dengan 3 nozle terakhir konsentrasi turun menjadi 71- 81ppm (81.143-92.571µg/m<sup>3</sup>) pada penyemprotan dengan 4 buah nozzle, apabila dibandingkan dengan baku udara ambient 10.000 µg/m<sup>3</sup>, konsentrasi CO pada ga buang masih jauh lebih tinggi, namun sudah mampu menurunkan zat pencemar CO sekitar 51 %, berarti masih perlu upaya penurunan konsentrasi CO, dengan cara meningkatkan suhu pembakaran menjadi 850 °C, sesuai standar.



**Gambar 4.3 b** Grafik Pengaruh penambahan Nozle terhadap konsentrasi CO dan CO<sub>2</sub> pada gas buang

## Parameter PM2.5

Pada gambar 4.3d terlihat konsentrasi PM<sub>2.5</sub> tertinggi pada kondisi 0 *nozzle*, dengan nilai rata-rata di kisaran 110-120 µg/m<sup>3</sup>. Hal ini menunjukkan konsentrasi PM<sub>2.5</sub> tanpa perlakuan wet scrubber melebihi standar baku mutu emisi gas buang (Secara bertahap, konsentrasi ini menurun seiring dengan penambahan *nozzle*. Pada 1 *nozzle*, konsentrasi sedikit menurun namun masih relatif tinggi, sekitar 100-110 µg/m<sup>3</sup>. Penurunan yang lebih signifikan terlihat pada 2 *nozzle* dan 3 *nozzle*, di mana konsentrasi PM<sub>2.5</sub> berada di kisaran 60-70 µg/m<sup>3</sup> (untuk 2 *nozzle*) dan 40-50 µg/m<sup>3</sup> (untuk 3 *nozzle*). Kondisi 4 *nozzle* menunjukkan konsentrasi PM<sub>2.5</sub> yang paling rendah, secara konsisten di bawah 50 µg/m<sup>3</sup>, bahkan beberapa kali mencapai sekitar 45 µg/m<sup>3</sup>. Hal ini jelas menunjukkan bahwa semakin banyak *nozzle* yang digunakan, semakin efektif proses penyisihan partikel halus dari gas buang. Parameter yang paling signifikan penurunannya adalah PM<sub>2.5</sub>, dengan penurunan mencapai 52,83 % saat menggunakan 4 *nozzle*. Ini menunjukkan efektivitas *wet scrubber* dalam menangkap partikulat halus.



Gambar 4.3.2 d Pengaruh Penambahan Nozzle pada penurunan PM<sub>2.5</sub>

Dilihat dari hasil dicapai pada penurunan PM<sub>2.5</sub> dibawah 50 µg/m<sup>3</sup>, artinya bahwa wet scrubber dengan system nozzle, cocok digunakan untuk memperangkap partikel halus yang terkandung pada gas buang insinerator sampah, hal ini sejalan dengan pernyataan **Mussatti and Hemmer( 2002)** bahwa, *Wet Scrubber* adalah perangkat pengendalian polusi udara yang menghilangkan gas *Partikulat Matter* (PM) dan asam dari aliran gas limbah dari sumber titik stasioner. Polutan dihilangkan terutama melalui impaksi, difusi, intersepsi dan/atau penyerapan polutan ke tetesan cairan. Cairan yang mengandung polutan kemudian dikumpulkan untuk dibuang. Ada banyak jenis penggosok basah yang menghilangkan gas asam dan PM.

#### 4.4 Uji Jarrest pada air bekas pembersih

Air bekas pencucian gas buang pada system *wet scrubbing*, mengandung partikel polutan yang menempel dari gas buang. Oleh karena itu perlu dibersihkan Kembali agar air tersebut dapat digunakan Kembali. Koagulan yang digunakan dalam penelitian ini, adalah koagulan alami, agar tidak menimbulkan masalah baru dari lumpur yang dihasilkan. Dua jenis koagulan digunakan untuk membandingkan hasil yang paling baik, yaitu koagulan dari biji kelor dan koagulan dari Chitosan; kedua jenis koagulan ini di coba dengan variaasi dosis untuk mendapatkan hasil optimal.

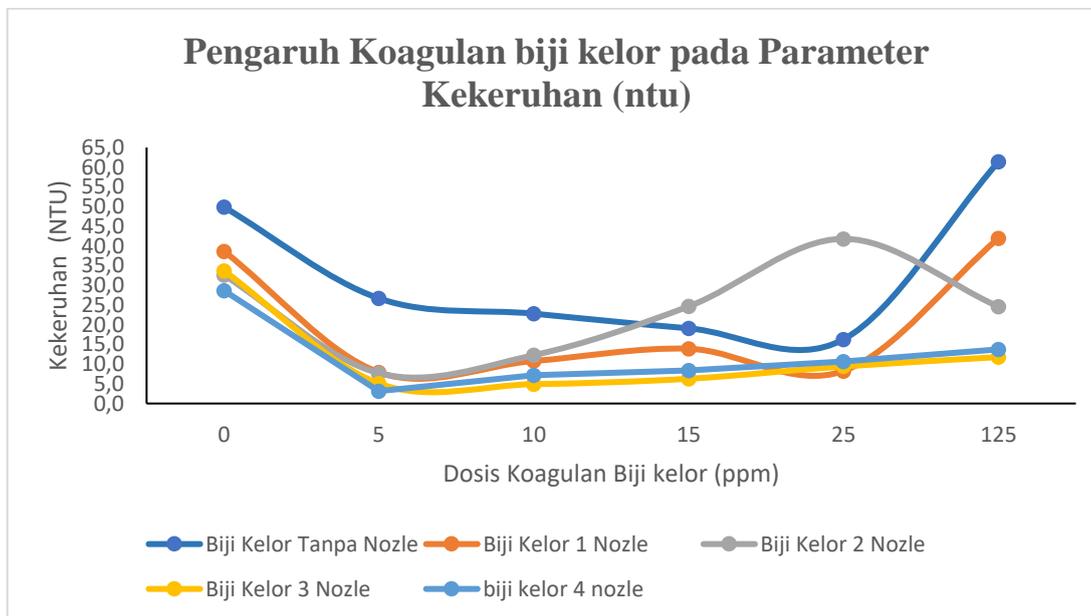
Nilai kekeruhan pada air menunjukkan adanya impuritis pada air, pada system wet scrubber, air digunakan untuk memperangkap kotoran/impuritis yang terkandung pada gas buang hasil pembakaran. Pada table 4.3 dapat dilihat Dosis koagulan 0 ppm, menunjukkan air bekas cucian gas buang, yang belum dilakukan pembubuhan koagulan. sedangkan tanpa nozzle dan dengan nozel menunjukkan jumlah air yang digunakan pada saat pencucian. Pada Tabel 4.3 dapat dilihat bahwa tingkat kekeruhan pada tanpa nozle lebih tinggi dibanding dengan adanya nozel lebih tinggi yaitu 49,9 NTU pada tanpa nozzle, dan pada 1 nozle kekeruhan air 38,7 NTU, pada 2 nozle kekeruhan air 32,6 NTU dan pada 3 nozle kekeruhan air 33,7NTU, ini artinya, semakin banyak air pencucian kekeruhan menurun, menunjukkan adanya pengenceran. Debit tiap nozzle adalah sebesar ...ml/menit.

**Tabel 4.3 Kualitas Air bekas pencucian Wet Scrubber**

<b>Kualitas Air Bekas pembersih pada wet scrubber</b>			
<b>Air pembersih</b>	<b>kekeruhan NTU</b>	<b>pH</b>	<b>Keterangan</b>
Tanpa Nozzle	49,9	5,8	
Satu Nozzle	38,7	6,8	
Dua Nozzle	32,6	6,2	
Tiga Nozzle	33,7	6,7	
Empat Nozzle	28,7	6,7	

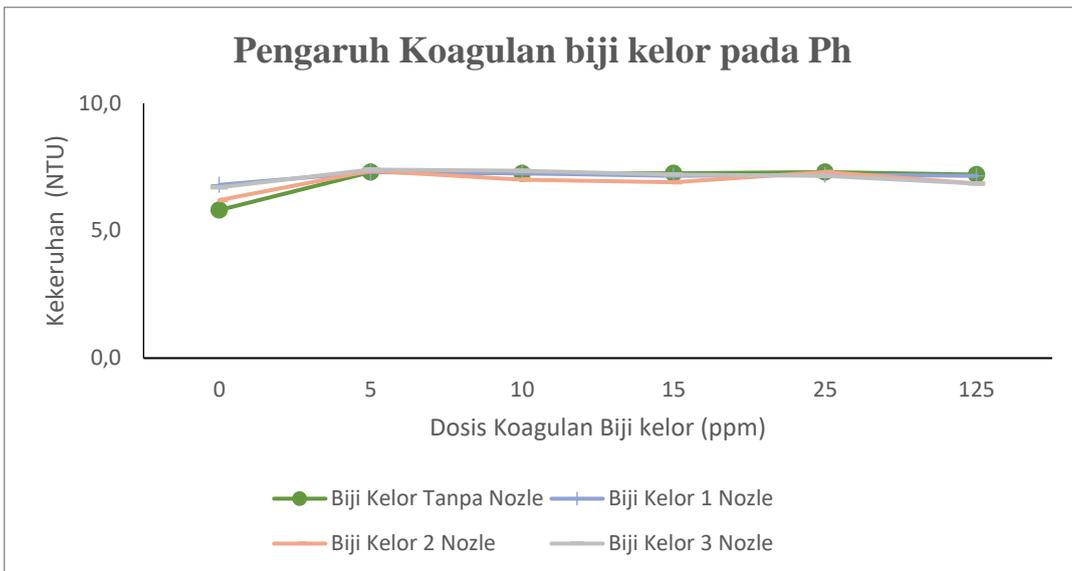
#### 4.4.1 Pengaruh Koagulan biji Kelor

Dari hasil uji jartest pengaruh koagulan biji kelor terhadap parameter kekeruhan kualitas air sisa cucian dapat dilihat pada Gambar 4.4 a, menunjukkan bahwa adanya pengaruh penambahan dosis koagulan dari 5 ppm sampai ke 25 ppm nilai kekeruhan menurun, namun pada dosis koagulan 125 ppm, nilai kekeruhan meningkat; Hal ini menunjukkan bahwa pada dosis 125 ppm sudah terjadi kelebihan dosis, yang mana koagulan sisa yang tidak terikat pada impuritis, menjadi zat pengganggu dan menimbulkan kekeruhan pada air. Pada koagulan biji kelor, dosis yang paling baik ada pada dosis 25 ppm, yaitu kekeruhan mencapai 16,7 ppm pada air pencucian tanpa nozzle, dosis 5 ppm mencapai kekeruhan 7,9 ppm pada air pencucian 1 nozzle, pada air pencucian dengan 2 nozle dosis 5 ppm dapat menurunkan kekeruhan sampai pada 7,7 ppm, dan pada air pencucian dengan 3 nozzle dosis koagulan 5 ppm dapat menurunkan kekeruhan pada tingkat 5,1 NTU. Pada grafik 4.4 a menunjukkan bahwa hasil terbaik diperoleh pada kondisi air pencucian dengan 3 nozle, dengan dosis koagulan 5 ppm dapat menurunkan kekeruhan sampai 5,1 NTU. air ini dapat digunakan kembali sebagai air pencuci atau penyiraman tanaman di lingkungan sekitar.



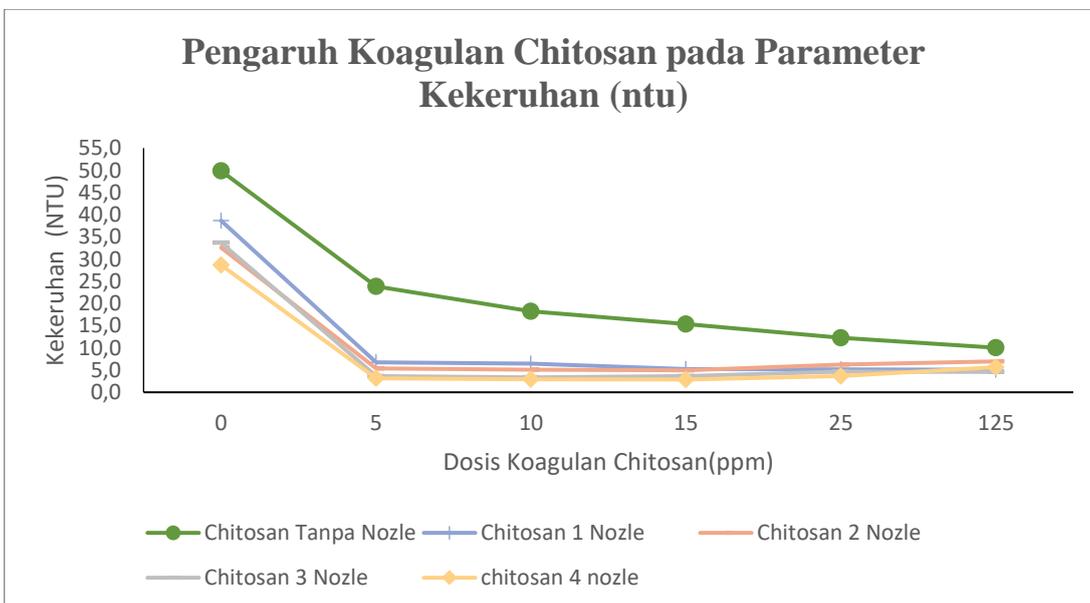
**Gambar 4.4 a. Pengaruh Koagulan Biji Kelor terhadap penurunan Kekeruhan**

Dari data pada gambar 4.4a menunjukkan bahwa biji kelor dapat dimanfaatkan sebagai koagulan alami, salah keuntungan penggunaan koagulan alami ini adalah lumpur yang dihasilkan tidak akan menimbulkan masalah, dibanding dengan penggunaan koagulan kimia, seperti Aluminium Sulfat. Pada beberapa penelitian dijelaskan bahwa biji kelor dapat digunakan sebagai koagulan alami, seperti pada penelitian Aphirtha et al, menjelaskan kemampuan menghilangkan polutan dari air limbah tahu pada pH air limbah menggunakan koagulan biji kelor dapat dijelaskan bahwa penurunan kekeruhan, TSS, COD, dan BOD menggunakan 3 gram koagulan biji kelor adalah yang paling optimal pada pH 7-8. (Apirtha,dkk 2023)



Gambar 4.4 b. Pengaruh Koagulan Biji Kelor terhadap pH

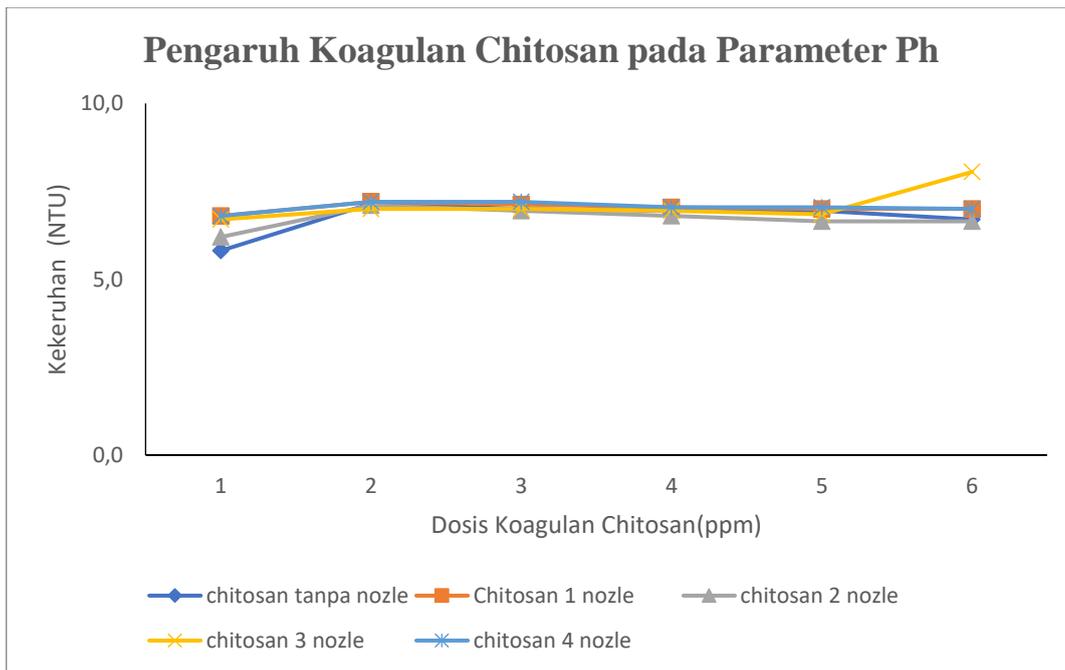
Dari grafik 4.4.b dapat dilihat bahwa koagulan biji kelor tidak memberikan efek penurunan pH air, bahkan nilai pH cenderung meningkat terlihat pada kadar pH dengan variasi dosis berkisar pada pH 6,2 sampai 7,4. Kenaikan dosis koagulan biji kelor cenderung meningkatkan pH, kecuali pada dosis koagulan biji kelor 125 ppm pH turun sampai nilai 3,4. Pada semua kondisi pemaian iar pencuci (jumlah nozzle), dosis koagulan 10 ppm, dengan nilai kekeruhan 4,3 dan pH 7.



Gambar 4.4c Pengaruh koagulan Chitosan terhadap kekeruhan

Penggunaan koagulan chitosan, menunjukkan hasil lebih baik dari pada koagulan biji kelor, terlihat pada gambar 4.4c, dosis chitsan 10 ppm baik untuk jumlah 1 nozzle , 2 nozzle , 3 nozzle maupun 4 nozzle, kekeruhan berhasil diturunkan sampai nilai dibawah 5 NTU; Bahkan untuk air pencuci dengan 4 nozzle

dosis chitosan 5ppm maupun dosis chitosan 10 ppm berhasil diturunkan sampai nilai kekeruhan dibawah 3 NTU.



Gambar 4.4d Pengaruh koagulan Chitosan terhadap pH

Dilihat dari gambar 4.4.d menunjukan kecenderungan penggunaan koagulan chitosan, tidan memberikan efek penurunan pH pada air terolah, bahkan cenderung naik.

## BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 KESIMPULAN

Penelitian ini dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Sampah yang masuk ke tungku pembakaran sampah di TPS3R Trisakti adalah berupa residu sebanyak 3 % dari total sampah yang masuk, dengan jenis kain, kayu, tali, dan barang-barang yang dapat dibakar dan tidak dapat masuk ke mesin pencacah
2. Penggunaan nozzle dalam menyemprotkan air pembersih pada wet scrubber sangat efektif, karena disamping peletakan nozzle ditengah bak, juga nozzle menyemprotkan air pembersih secara bertekanan dan melebar.
3. Penggunaan nozzle pada wet scrubber memberikan kontribusi yang significant dalam mengurangi zat pencemar, dengan menggunakan nozzle PM<sub>2,5</sub> turun dari 120-129  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  menjadi 45-71  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , CO<sub>2</sub> turun dari 112-119  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  menjadi 63-85  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  dan CO dari 146-167  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  menjadi 69-94  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (standar baku mutu emisi gas buang adalah PM<sub>2,5</sub> 55  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  dan CO 400  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).
4. Pengolahan air bekas pencucian dengan menggunakan koagulan chitosan lebih baik dari koagulan chitosan, dengan dosis 10 ppm pada 4 nozzle, mampu menurunkan kekeruhan sampai pada 3 NTU, pada pH 7

### 5.2. SARAN

Dari hasil penelitian ini maka dirumuskan beberapa saran yang dapat dilakukan untuk meningkatkan kinerja Tungku pembakaran sampah sebagai berikut:

- Hasil penelitian, menunjukkan *wet scrubber* efektif menurunkan emisi PM<sub>2.5</sub> dan CO, namun efisiensinya terhadap gas seperti CO<sub>2</sub> dan NO<sub>x</sub> masih terbatas. Oleh karena itu, disarankan untuk mengembangkan *wet scrubber* dengan penambahan media absorpsi kimia (seperti larutan NaOH atau amina) yang mampu meningkatkan penangkapan gas-gas bersifat asam dan rumah kaca. Penggabungan dengan reaktor kimia sederhana juga dapat dipertimbangkan untuk meningkatkan efisiensi sistem secara keseluruhan.
- Dalam penelitian ini, pengukuran dilakukan secara periodik dengan *gas detector*. Untuk pengawasan yang lebih akurat dan responsif, disarankan agar incinerator dilengkapi dengan sistem sensor gas dan PM<sub>2.5</sub> secara kontinu (*continuous emission monitoring system/CEMS*). Sistem ini akan memudahkan operator dalam mengontrol proses pembakaran dan menyusun strategi operasional untuk menghindari lonjakan emisi.
- Penelitian menunjukkan bahwa suhu pembakaran, waktu tinggal (*residence time*), dan distribusi udara pembakaran sangat berpengaruh terhadap pembentukan emisi, terutama CO dan NO<sub>x</sub>. Disarankan untuk melakukan kalibrasi dan evaluasi berkala terhadap pembakaran agar suhu tetap stabil di atas 850°C dan distribusi udara
- Penelitian dapat dilanjutkan dengan menguji terhadap variasi jenis sampah, kecepatan pembakaran, dan pengujian terhadap parameter lainnya.

## DAFTAR PUSTAKA

- 1) Undang- Undang Republik Indonesia no 18 Tahun 2008 Tentang Pengelolaan Sampah
- 2) Olisa at all, 2016, The Design and Construction of a Step Grate Incinerator, Global Journal of Researches in Engineering: A Mechanical and Mechanics Engineering, Volume 16 Issue 3 Version 1.0 Year 2016
- 3) Muchlisinalahuddin dkk, 2020 Tempat Pembakaran Sampah Organik, Rang Teknik Journal, Vol. 3 No.1 Januari 2020, <http://dx.doi.org/10.31869/rtj.v3i1.1680>
- 4) Amad Narto, dkk, 2023, Implementasi Alat Pembakaran Sampah (Insinerator) dan Penanggulangan sampah dari operasi kapal, Jurnal Saintek Maritim, Volume 24 Nomor 1, September 2023
- 5) Rachmat R. dkk, 2013, Penetrulan Zat Asap Pembakaran Sampah Berbasis Nano Pulsed Plasma “Petir Buatan” <https://media.neliti.com/media/publications/171171-ID-penetrulan-zat-asap-pembakaran-sampah-be.pdf>
- 6) Annisa J R, Joni Hermana, 2020, Kajian Pembakaran Sampah Plastik Jenis Polipropilena (PP) Menggunakan Insinerator, Jurnal Teknik ITS Vol. 9, No. 2, (2020) ISSN: 2337-3539 (2301-9271 Print)
- 7) Cyril Varghese, at all, 2016, Design and Development of Portable Incinerator, International Journal of Advanced Research (2016), Volume 4, Issue 3, 1529-1531
- 8) Damanhuri dan Padmi, 2019, Pengelolaan Sampah terpadu, Edisi kedua, ITB Press, Jl. Ganeca no 10, Bandung, Jawa Barat, ISBN 978-602-7861-33-6
- 9) Kementerian Koordinator Bidang Perekonomian Republik, 25 Oktober 2022, siaran Pers HM.4.6/600/SET.M.EKON.3/10/2022 tentang **Akselerasi Net Zero Emissions, Indonesia Deklarasikan Target Terbaru Penurunan Emisi Karbon.** <https://ekon.go.id/publikasi/detail/4652/akselerasi-net-zero-emissions-indonesia-deklarasikan-target-terbaru-penurunan-emisi-karbon>.
- 10) **Pradani, Y. K.** (2020). *Kajian Penurunan Emisi Dengan Menggunakan Venturi Vacuum Pada Sistem Three-Stage Filter Wet Scrubber* (Tesis Magister). Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- 11) **Pemerintah Republik Indonesia.** (2021). *Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup.*
- 12) **Wikipedia Contributors.** (2025). *Heat of combustion.* In *Wikipedia.* (Menyediakan penjelasan tentang HHV dan LHV serta rumus Dulong).
- 13) **Wikipedia Contributors.** (2025). *Wet scrubber.* In *Wikipedia.* (Referensi umum mengenai desain dan mekanisme wet scrubber).
- 14) **ResearchGate (Buswell’s Model).** (2025). *Buswell’s Model for Calculating Theoretical Higher Heating Value of Organic Matter.*
- 15) **ResearchGate.** (2022). *Determination of Higher Heating Value by calculation based on elemental analysis.*
- 16) **KLHK – Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia.** (2023). Laporan Penanganan Sampah Nasional: Timbulan & Pengelolaan Sampah.
- 17) **Lee, M., Park, J., & Shin, H.** (2018). Increase in wet scrubber efficiency by adding more nozzles and particulate filter combination for PM<sub>2.5</sub> and CO<sub>2</sub> removal. *Journal of Environmental Engineering*, 144(2), 01218006.
- 18) **Pirbadali Somarin, M., & Peyghambarzadeh, S. M.** (2020). Emission characteristics of dioxins and furans during incineration processes. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(30), 37509–37519.
- 19) **Pradani, Y. K.** (2020). *Kajian Penurunan Emisi Dengan Menggunakan Venturi Vacuum Pada Sistem Three-Stage Filter Wet Scrubber* (Thesis, Institut Teknologi Sepuluh Nopember).

- 20) **Varghese, P. L., Aris, A. Z., & Daud, M. Z.** (2016). Waste-to-energy approaches in Malaysia: Opportunities and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64, 1387–1395.
- 21) **Wansom, N., Kiatkittipong, W., & Pumijumnong, N.** (2023). Advanced wet scrubber performance for ultrafine particle removal in industrial emissions. *Journal of Cleaner Production*, 381, 135194.
- 22) **World Bank.** (2018). *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*.
- 23) Joseph, O, 2022 The Design And Construction of a Mobile Waste Incinerator for Agro Combustible waste
- 24) Setyawati, et al., 2018. Efektifitas Biji Kelor dan Tawas sebagai Koagulan pada Peningkatan Mutu Limbah Cair Industri Tahu. *Jurnal Teknik Kimia UPN Veteran Jatim*, Vol 12 No.2.
- 25) Judith et al., 2021. Aplikasi Serbuk Flamboyan dalam Pengolahan Air Bersih
- 26) Aziz et al., 2015. Polisakarida sebagai Koagulan Alami.
- 27) S Aphirta, dkk 2023 Determination of the optimum organic coagulants dosage in tofu industrial wastewater treatment IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 1203 (2023) 012049 <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1203/1/012049>
- 28) Daniel Mussatti and Paula Hemmer, 2002 Wet Scrubbers for Particulate Matter, EPA/452/B-02-001 <https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-07/documents/cs6ch2.pdf>
- 29) Ilmi dkk, 2025 Pengolahan Gas Buang Hasil Pembakaran Campuran Refuse Derived Fuel dan Serbuk Gergaji dengan Spray Tower Scrubber, *IRA Jurnal Teknik Mesin dan Aplikasinya (IRAJTMA)* Vol. 4, No. 1, 2025, pp. 136-146, e-ISSN: 2962-4290 <https://e-journals.irapublishing.com/index.php/IRAJTMA/article/download/190/202>
- 30) Gusdini dkk, 2023 Uji Kinerja Insinerator dan Alat Pengendali Pencemaran Udara untuk Meminimalkan Dampak Limbah B3 *Jurnal Teknologi lingkungan*, Vol. 24 No.1 (Januari 2023) 001-009, e-ISSN 2548-6101 p-ISSN 1411-318X <https://ejournal.brin.go.id/JTL/article/download/248/141/1013>
- 31) Xia, H., Tang, J., & Aljerf, L. (2022). Dioxin emission prediction based on improved deep forest regression for municipal solid waste incineration process. *Chemosphere*, 294(September 2021), 133716. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133716>
- 32) Lasmana dkk, 2024 Rancang Bangun Alat Pembakar Sampah ( Incinerator ) Dengan Burner Oli Bekas, *JTRAIN : Jurnal Teknologi Rekayasa Teknik Mesin*, Vol. 2, No. 1, 2021: 35-40, DOI: [10.24252/jft.v11i1.45734](https://doi.org/10.24252/jft.v11i1.45734)

...

# LAMPIRAN 1. ROAD MAP PENELITIAN

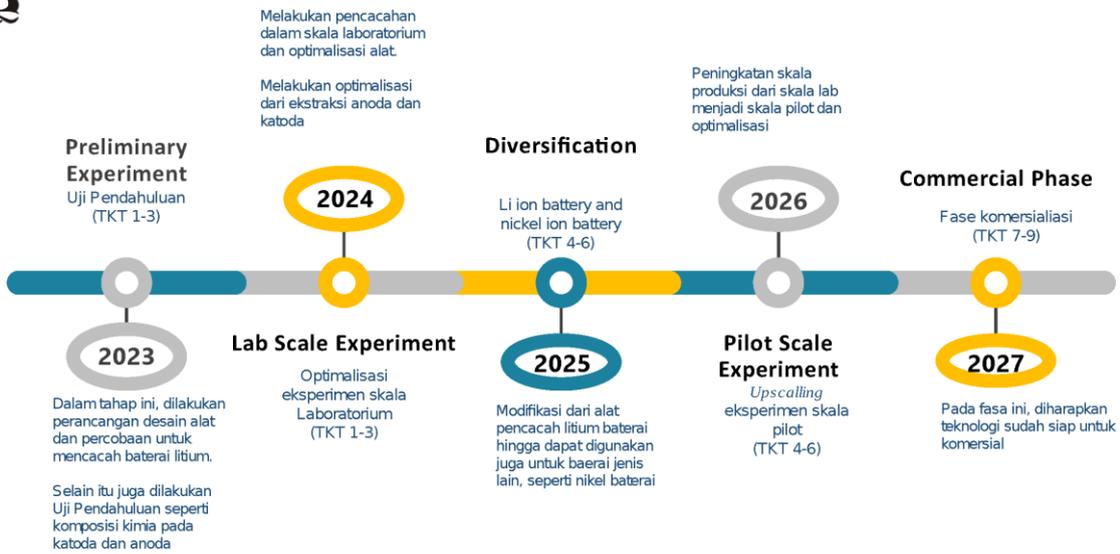


**PETA JALAN PENELITIAN <Dr. Ir. Ratnaningsih, MT>**



**ROAD MAP PENELITIAN DAN PENGABDIAN KEPADA MASYARAKAT**

**<Sarah Aphirta, ST., MT>, <3835/USAKTI>, <0321129501>**



### PETA JALAN PENELITIAN ERSAN YUDHAPRATAMA MUSLIH

## **LAMPIRAN 2. LUARAN PENELITIAN**

### **LUARAN 1 :**

Kategori Luaran : Artikel Ilmiah

Status :

Jenis Publikasi Jurnal : Jurnal Nasional Terakreditasi

Nama Jurnal : ENVIROTEK - Jurnal Ilmiah Teknik Lingkungan

ISSN : 2623-1336

EISSN : 2085-501X

Lembaga Pengindek : SINTA

Url Jurnal : <https://envirotek.upnjatim.ac.id/index.php/envirotek/user/register>

Judul Artikel : Modifikasi Wet Scrubber pada Tungku Pembakar Sampah

### **LUARAN 2 :**

Kategori Luaran : Hak Kekayaan Intelektual

Status :

Jenis HKI : Hak Cipta

Nama HKI : Penggunaan Biokoagulan Kitosan dalam Pengolahan Air Limbah Wet Scrubber : Studi

Kasus di TPS3R Nagrak Universitas Trisakti

### **LUARAN 3 :**