



JURUSAN
TEKNIK LINGKUNGAN

TUGAS AKHIR

Analisis Kandungan Klorin (Cl) dan Logam Berat pada *Refuse Derived Fuel* (RDF) dan Abu Sisa Pembakaran di TPST Sendangsari, Sleman, D. I. Yogyakarta

Riski Sri Utami

22513150

Dosen Pembimbing:

Ir. Fajri Mulya Iresha, S.T., M.T., Ph.D., I.P.M.

Program Studi Teknik Lingkungan Program Sarjana

Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan

Universitas Islam Indonesia

2026



DEPARTMENT
ENVIRONMENTAL ENGINEERING

BACHELOR THESIS

**Analysis of Chlorine (Cl) and Heavy Metal Content in Refuse
Derived Fuel (RDF) and Combustion Ash at the Sendangsari
Integrated Waste Management Facility (TPST), Sleman
Regency, Special Region of Yogyakarta**

Riski Sri Utami

22513150

Supervisor:

Ir. Fajri Mulya Iresha, S.T., M.T., Ph.D., I.P.M.

Environmental Engineering Bachelor Program

Faculty of Civil Engineering and Planning

Universitas Islam Indonesia

2026

LEMBAR PENGESAHAN

Analisis Kandungan Klorin (Cl) dan Logam Berat pada *Refuse Derived Fuel* (RDF) dan Abu Sisa Pembakaran di TPST Sendangsari, Sleman, D.I. Yogyakarta

Tugas akhir ini disusun dan diajukan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Teknik (S.T.) pada Program Studi Teknik Lingkungan Program Sarjana Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia.

Riski Sri Utami
22513150

Tugas akhir ini telah diuji pada tanggal 7 Juli 2026 dan disetujui oleh:

Ir. Fajri Mulya Iresha, S.T., M.T., Ph.D., I.P.M.

 22/7/2026

Supriyanto, S.T., M.Sc., M.Eng., Ph.D.

 22/7/2026

Ir. Niesha Hanum Mistoro, S.T., M.Eng., I.P.P.

 22/07/2026

Mengetahui,
Ketua Prodi Teknik Lingkungan Program Sarjana



Ir. Any Juliani, S.T., M.Sc. (Res. Eng.), Ph.D.

PERNYATAAN

Saya, penyusun tugas akhir ini, menyatakan bahwa:

1. Karya tulis ini adalah asli dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar akademik apapun, baik di Universitas Islam Indonesia, maupun di perguruan tinggi lainnya.
2. Karya tulis ini merupakan gagasan, rumusan, dan studi saya sendiri, tanpa bantuan pihak lain, kecuali arahan dosen pembimbing.
3. Dalam karya tulis ini tidak terdapat karya atau pendapat orang lain, kecuali secara tertulis dengan jelas dicantumkan sebagai acuan dalam naskah dengan disebutkan nama penulis dan dicantumkan dalam daftar pustaka.
4. Perangkat lunak atau program komputer yang digunakan dalam tugas akhir ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab saya. Bukan tanggung jawab Universitas Islam Indonesia.
5. Tidak ada penggunaan kecerdasan buatan (*artificial intelligence*, AI) dalam penyusunan karya tugas akhir ini kecuali:
 - a. untuk membantu dalam kadar yang wajar (seperti membantu mengoreksi, mencari ide, dan mencari referensi), dan
 - b. tercantum dan dijelaskan perihal penggunaannya secara eksplisit di dalam karya tugas akhir ini.

Implikasi dari penggunaan AI tersebut menjadi tanggung jawab saya sepenuhnya.

6. Pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya. Apabila di kemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, saya bersedia menerima sanksi akademik dengan pencabutan gelar yang sudah diperoleh serta sanksi lainnya sesuai dengan norma yang berlaku di perguruan tinggi.

Yogyakarta, 29 Mei 2026

Yang membuat pernyataan,



Riski Sri Utami

22513150

PRAKATA

Bismillahirrahmanirrahim.

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT., atas limpahan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “Analisis Kandungan Klorin (Cl) dan Logam Berat pada *Refuse Derived Fuel* (RDF) dan Abu Sisa Pembakaran di TPST Sendangsari, Sleman, D. I. Yogyakarta”. Tugas Akhir ini menjadi salah satu syarat akademik dalam memperoleh gelar sarjana (S1) di Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.

Pencapaian penulis dalam menyelesaikan penyusunan Tugas Akhir ini tidak lepas dari berbagai pihak yang telah memberikan dukungan serta motivasi selama proses penyusunan Tugas Akhir ini hingga selesai. Oleh karena itu, dengan segenap ketulusan hati penulis mengucapkan terimakasih sebesar – besarnya kepada :

1. Kepada kedua orang tua tercinta, Bapak Ripan dan Ibu Sri Hartati, yang selalu memberikan dukungan dan motivasi kepada penulis. Meskipun Ayah dan Mama tidak berkesempatan untuk menempuh pendidikan hingga bangku perkuliahan, keduanya selalu mengupayakan agar anak – anaknya dapat menempuh pendidikan setinggi – tingginya. Mereka tidak pernah berhenti memberikan kasih sayang, dukungan moral dan material, serta doa untuk kelancaran dan kemudahan penulis. “*Kami bisa kasih kamu harta untuk bekal hidupmu, tapi bakal habis dalam sekejap. Tapi dengan bekal ilmu tidak akan habis dan akan bermanfaat terus kedepan*”, motivasi yang terus menjadi penyemangat bagi penulis untuk dapat menyelesaikan perkuliahan.
2. Bapak Ir. Fajri Mulya Iresha, S.T., M.T., Ph.D., I.P.M., Bapak Supriyanto, S.T., M.Sc., M.Eng., Ph.D., dan Ibu Ir. Niesa Hanum Mistoro, S.T., M.Eng., I.P.P. selaku dosen pembimbing dan dosen

penguji yang telah memberikan arahan, masukan, dan kemudahan kepada penulis dalam setiap proses penyusunan Tugas Akhir ini.

3. Seluruh dosen Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia, khususnya Program Studi Teknik Lingkungan, yang telah memberikan bimbingan, ilmu pengetahuan, serta wawasan yang luas kepada penulis selama proses perkuliahan.
4. Kepada adik – adik tersayang, Via Meyrissa dan Kemal Athaya Nuha, yang senantiasa menjadi pelengkap dan memberikan banyak warna dalam hidup penulis. Keceriaan dan tawa mereka selalu menjadi kekuatan penulis untuk melakukan yang terbaik dan menjadi sosok kakak yang mereka banggakan. Terima kasih atas doa dan cinta yang selalu diberikan kepada penulis, tumbuh lebih baik dengan versi terbaik.
5. Teman – teman seperjuangan penulis, terkhusus kepada sahabat penulis, Lubna Mutiara Adha dan Hassya Amaris Santi, yang telah kebersamai penulis sejak semester 1 hingga semester akhir. Keduanya selalu membantu dan menemani penulis pada saat dibutuhkan dan saling memberikan semangat untuk dapat menyelesaikan semester demi semester bersama. Terima kasih selalu mendengarkan curahan hati dan keluh kesah penulis tanpa menghakimi. Terima kasih atas dukungan yang diberikan selama 8 semester menjalani perkuliahan.
6. Kepada sahabat penulis sejak SMA, D2INR (Deswita Nur Alifah, Dina Ayu, Isti Septianing, dan Nurrohmah), dan Umi Nafiah yang telah kebersamai penulis sejak SMA hingga saat ini. Terima kasih atas kebersamaan, dukungan, dan doa yang diberikan kepada penulis. Kehadiran dan persahabatan kalian menjadi bagian penting dalam perjalanan hidup penulis dan menjadi sumber semangat penulis hingga tahap ini. Terima kasih selalu menemani, mendengarkan keluh kesah penulis, dan menjadi saksi lika – liku perjalanan hidup penulis selama ini. Terima kasih selalu memberikan semangat dan dukungan agar

penulis dapat terus berjuang hingga sampai pada titik ini.

7. Kepada keluarga besar, kakek, nenek, serta saudara – saudara yang tidak dapat disebut satu per satu, terima kasih atas semangat dan doa yang diberikan kepada penulis.
8. Seluruh pihak yang, memberikan dukungan serta doa dalam proses penyusunan Tugas Akhir ini yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.
9. *Last but not least*, kepada diri saya sendiri Riski Sri Utami. Terima kasih telah bertahan hingga saat ini ditengah lelah dan keraguan. Apresiasi yang sebesar – besarnya telah berjuang untuk dapat menyelesaikan apa yang telah dimulai. Setiap air mata, doa, dan usaha telah menjadi saksi berharga dalam proses ini. Setiap malam dengan isi kepala yang berisik dan penuh kekhawatiran, berkali – kali hampir menyerah, berbagai tekanan dan hal – hal diluar rencana, terima kasih tetap kuat menjalani dengan hati yang ikhlas. Terima kasih telah berjuang melewati semester demi semester dengan usaha terbaik. Pencapaian ini bukan akhir, melainkan menjadi awal perjalanan baru untuk mencapai mimpimu.

Sleman, 29 Mei 2026

Riski Sri Utami



***Refuse Derived Fuel (RDF)* dan Abu Sisa Pembakaran di TPST Sendangsari, Sleman, D.I. Yogyakarta**

Mahasiswa : Riski Sri Utami
NIM : 22513150
Program Studi : Teknik Lingkungan - Program Sarjana
Pembimbing : Ir. Fajri Mulya Iresha, S.T., M.T., Ph.D., I.P.M.

Abstrak

Peningkatan timbunan sampah di Kabupaten Sleman mendorong adanya pengembangan pengolahan sampah dengan menggunakan teknologi *Refuse Derived Fuel* (RDF) yang dapat digunakan sebagai bahan bakar alternatif. TPST Sendangsari merupakan salah satu tempat pengolahan sampah terpadu yang telah melakukan pengolahan sampah menjadi RDF. TPST sendangsari juga menggunakan alat *roraty drying* untuk pengeringan, dimana menghasilkan residu berupa Bottom Ash. Kandungan klorin (Cl) dan logam berat pada RDF maupun Bottom Ash yang dihasilkan perlu diketahui guna memastikan keamanan dan kualitas pemanfaatannya. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi kandungan klorin (Cl) dan kandungan logam berat yang meliputi Seng (Zn), Besi (Fe), Kromium (Cr), Kadmium (Cd) dan Timbal (Pb).

Penelitian ini menggunakan metode grab sampling dalam pengambilan sampel. Analisis kandungan logam berat menggunakan metode *Atomic Absorption Spectrophotometry* (AAS) yang mengacu pada SNI 8910-2021, sedangkan analisis kandungan klorin menggunakan metode Spektrofotometer UV-Vis dan mengacu pada SNI 8966-2021. Sebelum dianalisis, dilakukan preparasi sampel terlebih dahulu melalui proses pengeringan, pengabuan, dan destruksi asam. Hasil penelitian menunjukkan bahwa ketiga sampel uji terdapat kandungan logam berat dan klorin di dalamnya. kandungan klorin tertinggi terdapat pada sampel RDF Tersimpan dengan kadar 39,42 mg/kg dan terendah pada sampel *bottom ash* dengan kadar 5,20 mg/kg. Ketiga sampel uji terdapat kandungan logam berat dengan parameter tertinggi yaitu besi (Fe) dengan kadar 1692,85 mg/kg pada bottom ash, 1686,27 mg/kg pada RDF Baru (*Fresh RDF*), dan 1424,15 mg/kg pada RDF Tersimpan.

Kata kunci: *Besi (Fe), Klorin (Cl), Logam Berat, Refuse Derived Fuel (RDF)*

***Analysis of Chlorine (Cl) and Heavy Metal Content in Refuse
Derived Fuel (RDF) and Combustion Ash at the Sendangsari
Integrated Waste Management Facility (TPST), Sleman Regency,
Special Region of Yogyakarta***

Student : Riski Sri Utami
Student Number : 22513150
Study Program : Environmental Engineering – Bachelor Program
Supervisor : Ir. Fajri Mulya Iresha, S.T., M.T., Ph.D., I.P.M.

Abstract

The increase in waste generation in Sleman Regency has spurred the development of waste processing using Refuse Derived Fuel (RDF) technology, which can be used as an alternative fuel. The Sendangsari Integrated Waste Management Facility (TPST) is one of the integrated waste processing sites that has been converting waste into RDF. The Sendangsari TPST also uses a rotary dryer for drying, which produces a residu known as Bottom Ash. The chlorine (Cl) and heavy metal content in both the RDf and the resulting Bottom Ash need to be determined to ensure the safety and quality of thei utilization. This study aims to identify the shlorine (Cl), content and heavy metal content, including Zinc (Zn), Iron (Fe), Chromium (Cr), Cadmium (Cd), and Lead (Pb).

This study use the grab sampling method for sample colletion. Analysis of heavy metal content utilized Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS) in accordance with SNI 8910-2021, while analysis of chlorine content utilized UV-Vis Spectrophotometry in accordance with SNI 8966-2021. Prior the analysis, the sample were prepared through a process of drying, incineration, and acid digestion. The result of the study showed that all three test sample contained heavy metal and chlorine. The highest chlroine content was found in the dry RDF sample, with concentration of 39,42 mg/kg, and the lowest in the bottom ash sample with a concentration of 5,20 mg/kg. All three test sample contained heavy metals, with highest concentration being iron (Fe) at 1692,85 mg.kg in bottom ash, 1686,27 mg/kg in wet RDF, and 1424,15 mg/kg in dry RDF.

*Key words: Iron (Fe), Chlorine (Cl), Heavy Metals, Refuse Derived
Fuel (RDF)*

DAFTAR ISI

COVER

TUGAS AKHIR	1
LEMBAR PENGESAHAN	3
PERNYATAAN.....	4
PRAKATA	5
DAFTAR ISI	i
DAFTAR TABEL	iv
DAFTAR GAMBAR	v
DAFTAR LAMPIRAN	vi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan	3
1.4 Manfaat	4
1.5 Ruang Lingkup.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Profil TPST Sendangsari.....	6
2.2 Tempat Pengolahan Sampah Terpadu (TPST) Sendangsari	7
2.3 Pengertian Sampah.....	8
2.4 Jenis dan Karakteristik Sampah	8
2.5 Kandungan Klorin (Cl)	9
2.6 <i>Refuse Derived Fuel</i> (RDF)	10
2.7 Abu Dasar (<i>Bottom Ash</i>)	11

2.8	Logam berat (<i>Heavy Metal</i>)	11
2.9	Penelitian Terdahulu	13
BAB III METODE PENELITIAN.....		18
3.1	Kerangka Penelitian	18
3.2	Pengumpulan Data	19
3.2.1.	Data	19
3.2.2.	Lokasi dan Waktu	20
3.2.3.	Alat dan Bahan.....	21
3.3	Analisis Data	22
3.3.1	Analisis Kandungan Logam Berat	22
3.3.2	Perhitungan Kandungan Logam Berat.....	23
3.3.3	Analisis Kandungan Klorin (Cl)	24
3.3.4	Perhitungan Kandungan Klorin (Cl).....	25
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		26
4.1	Hasil	26
4.1.1	Kurva Kalibrasi dan Linearitas Metode AAS	26
4.1.1.1	Kurva Kalibrasi Logam Berat Seng (Zn).....	26
4.1.1.2	Kurva Kalibrasi Logam Berat Besi (Fe)	27
4.1.1.3	Kurva Kalibrasi Logam Berat Kromium (Cr).....	28
4.1.1.4	Kurva Kalibrasi Logam Berat Kadmium (Cd).....	29
4.1.1.5	Kurva Kalibrasi Logam Berat Timbal (Pb).....	30
4.1.1.6	Kurva Kalibrasi Klorin (Cl)	32
4.1.2	Hasil Pembacaan dengan AAS.....	33
4.2	Pembahasan.....	34
4.2.1	Pengolahan Sampah di TPST Sendangsari	34

4.2.2 Analisis Kandungan Logam Berat	38
4.2.3 Analisis Kandungan Klorin (Cl)	40
4.2.4 Perbedaan Karakteristik RDF dan <i>Bottom Ash</i>	42
4.2.5 Perbandingan Baku Mutu.....	45
4.2.6 Rekomendasi.....	47
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	48
5.1 Kesimpulan	48
5.2 Saran.....	48
DAFTAR PUSTAKA	49
LAMPIRAN 1	52
LAMPIRAN 2	54
LAMPIRAN 3	61
RIWAYAT HIDUP	64

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Jumlah Timbulan dan Komposisi Sampah di Sleman Tahun 2025	7
Tabel 2. 2 Baku Mutu Emisi Usaha Menggunakan RDF.....	12
Tabel 2. 3 Kualitas SRF berdasarkan standar EN 15359 : 2011	12
Tabel 3. 1 Sampel dan Parameter uji	19
Tabel 4. 1 Data Larutan Standar Zn	26
Tabel 4. 2 Data Larutan Standar Fe	27
Tabel 4. 3 Data Larutan Standar Cr	28
Tabel 4. 4 Data Larutan Standar Cd.....	30
Tabel 4. 5 Data Larutan Standar Pb	31
Tabel 4. 6 Data Larutan Standar Cl.....	32
Tabel 4. 7 Hasil Pengukuran Absorbansi Sampel.....	33
Tabel 4. 8 Hasil Pengukuran Konsentrasi (mg/L) Logam Berat.....	33
Tabel 4. 9 Hasil Pengukuran Absorbansi dan Conc (mg/L)Sampel	34
Tabel 4. 10 Hasil Pengukuran kadar (mg/kg) Logam Berat	34
Tabel 4. 11 Hasil Pengukuran kadar klorin.....	34
Tabel 4. 12 Komposisi sampah di TPST Sendangsari	38
Tabel 4. 13 Hasil Pengukuran Konsentrasi (mg/L) Logam Berat.....	39
Tabel 4. 14 Hasil Pengukuran kadar klorin.....	41
Tabel 4. 15 Kandungan Logam Berat dan Sumber.....	42
Tabel 4. 16 Klasifikasi SRF berdasarkan standar EN 15359 : 2011	45
Tabel 4. 17 Perbandingan hasil uji dengan standar EN 15359 : 2011	46
Tabel 4. 18 Hasil Pengukuran kadar (mg/kg) Logam Berat	46

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Grafik Komposisi dan Berat Sampah di Sleman Tahun 2025	7
Gambar 3. 1 Skema Kerangka Penelitian	18
Gambar 3. 2 Peta Titik Pengambilan Sampel di TPST Sendangsari	20
Gambar 3. 3 Langkah persiapan contoh uji dengan destruksi asam	23
Gambar 3. 4 Langkah persiapan contoh uji klorin.....	25
Gambar 4. 1 Kurva Kalibrasi Zn.....	27
Gambar 4. 2 Kurva Kalibrasi Fe	28
Gambar 4. 3 Kurva Kalibrasi Cr	29
Gambar 4. 4 Kurva Kalibrasi Cd.....	30
Gambar 4. 5 Kurva Kalibrasi Pb	31
Gambar 4. 6 Kurva Kalibrasi Cl	32
Gambar 4. 7 Diagram Alir Pengolahan Sampah TPST Sendangsari.....	35
Gambar 4.8 Sampah masuk dan Jembatan Timbang.....	36
Gambar 4.9 Dermaga Penuangan dan Gancu.....	36
Gambar 4.10 Mesin Konveyor dan Mesin <i>Crusher</i>	36
Gambar 4.11 Mesin Ayak dan Blower/Peniup.....	37
Gambar 4. 12 Mesin Cacah dan Mesin Press.....	37
Gambar 4. 13 Neraca Massa Pengolahan Sampah TPST Sendangsari.....	38
Gambar 4. 14 Diagram Perbandingan Kandungan Logam Berat	40
Gambar 4. 15 Diagram Perbandingan Kandungan Klorin.....	41
Gambar 4. 16 Diagram Perbandingan Kandungan Logam Berat pada RDF Baru (<i>Fresh</i> RDF) dan RDF Tersimpan	43
Gambar 4. 17 Diagram Perbandingan Kandungan Klorin (Cl) pada RDF dan <i>Bottom Ash</i>	44

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN 1	43
LAMPIRAN 2	45
LAMPIRAN 3	52

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Di Indonesia sampah masih menjadi permasalahan yang belum terselesaikan hingga saat ini. Timbulan sampah yang dihasilkan terus bertambah setiap tahunnya, sedangkan pengelolaan sampah belum efektif. Pengelolaan sampah yang hingga saat ini berjalan di Indonesia belum sepenuhnya sesuai dengan prinsip *reduce*, *reuse* dan *recycle* atau prinsip 3R (PermenLHK Nomor 14, 2021). Sistem pengelolaan sampah di Indonesia masih banyak menggunakan konsep *end-of-pipe*, yaitu timbulan sampah hanya sekadar dipindahkan dari berbagai sumber sampah menuju ke Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) (Kusuma, 2024).

Salah satu daerah dengan timbulan sampah yang terus bertambah berada di Daerah Istimewa Yogyakarta, yaitu Kabupaten Sleman dengan volume timbulan sampah yang cukup tinggi. Berdasarkan Badan Pusat Statistik tahun 2024 Kabupaten Sleman terbagi menjadi 17 kecamatan dan memiliki luas wilayah sebesar $574,82 \text{ km}^2$. Menurut data Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (SIPSN) pada tahun 2025 timbulan sampah harian di kabupaten Sleman mencapai 585,3 ton perhari dengan komposisi sampah meliputi sampah sisa makanan, kayu/ranting, kertas/karton, plastik, kaca, karet/kulit, kain, logam dan sampah lainnya. Komposisi paling banyak yaitu sampah sisa makanan sebanyak 272,11 ton perhari dan sampah plastik sebanyak 191,80 ton perhari. Dalam upaya mengoptimalkan pengelolaan sampah di kabupaten Sleman, dibangun Tempat Pengolahan Sampah Terpadu (TPST) untuk membantu mengurangi timbulan sampah yang masuk ke Tempat Pemrosesan Akhir (TPA).

Tempat Pengolahan Sampah Terpadu (TPST) Sendangsari merupakan salah satu tempat pengolahan sampah yang berada di kapanewon minggir, kabupaten Sleman, Yogyakarta. TPST ini memiliki kapasitas pengolahan sampah mencapai 20 – 40 ton sampah perhari. TPST Sendangsari menjadi sarana pengolahan sampah yang memberikan solusi dalam membantu mengatasi timbulan sampah yang terus

bertambah setiap tahunnya. TPST Sendangsari melakukan uji coba pengolahan sampah pada awal maret 2024, dengan kapasitas awal pengolahan sebesar 5 ton perhari (Kristyani, 2024). TPST Sendangsari melakukan pengolahan sampah anorganik menjadi *Refuse Derived Fuel* (RDF) yang dapat dijadikan bahan bakar alternatif untuk industri. TPST Sendangsari menjalin kerjasama dengan PT Solusi Bangun Indonesia (SBI) yang merupakan salah satu perusahaan semen di Cilacap, Jawa Tengah.

Refuse Derived Fuel (RDF) merupakan hasil proses pemisahan sampah anorganik atau limbah padat yang mudah terbakar dan tidak mudah terbakar yang dapat digunakan sebagai bahan bakar sekunder industri. Salah satu teknologi yang saat ini mulai banyak dikembangkan dalam meningkatkan energi terbarukan yaitu teknologi *Refuse Derived Fuel* (RDF) atau bahan bakar jumputan padat (Maulidayanti, dkk., 2024). Pembuatan RDF menjadi salah satu pengelolaan sampah yang menerapkan konsep *waste to energy*, dimana sampah tidak hanya berakhir di landfill namun memberikan nilai lebih sebagai bahan bakar energi terbarukan yang mendukung keberlanjutan (*sustainability*). TPST Sendangsari juga menerapkan teknologi *rotary drying* untuk menurunkan kadar air pada sampah, sehingga pemanfaatan menjadi lebih optimal. Pada proses *rotary drying* dihasilkan residu berupa abu dasar (*bottom ash*) yang dapat mengandung logam berat. Saat ini abu sisa pembakaran hanya dikumpulkan pada satu titik dan belum ada pengelolaan lebih lanjut.

Secara umum proses pembuatan RDF meliputi beberapa tahapan diantaranya, yaitu persiapan bahan baku, pemilahan sampah, analisis komposisi, dan pembuatan RDF (Dewi, dkk., 2025). Kualitas RDF yang dihasilkan sangat bergantung pada karakteristik sampah yang menjadi bahan dasar pembuatan, parameter – parameter seperti kadar abu, nilai kalor, kadar air, dan kandungan logam berat. RDF dengan kualitas yang baik umumnya memiliki nilai kalor yang tinggi dan konsentrasi senyawa toksik (logam berat dan klorin) yang rendah (Afifah, dkk., 2023).

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Sarquah, et.al. pada tahun 2023 di Ghana, RDF mampu menggantikan 10% - 30% konsumsi batubara industri. Selain itu, penelitian yang dilakukan oleh Salaripoor, et., al. Pada tahun 2025 di Iran menyatakan bahwa penggunaan RDF menurunkan *Global Warming Potential* (GWP) dibandingkan dengan batubara dan meningkatkan keberlanjutan energi industri semen. Saat ini belum ada analisis lebih lanjut terkait karakteristik RDF yang dihasilkan di TPST Sendangsari dan karakteristik abu dasar (*bottom ash*) yang dapat berpotensi mengandung unsur – unsur berbahaya seperti Timbal (Pb), Kadmium (Cd), Kromium (Cr), Seng (Zn), Klorin (Cl) dan Besi (Fe). Oleh karena itu, analisis terkait karakteristik RDF dan abu dasar (*bottom ash*) yang dihasilkan di TPST Sendangsari perlu dilakukan dalam memastikan keamanan, kelayakan serta efisiensi penggunaan RDF sebagai bahan bakar di sektor industri terutama pada industri semen.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang akan dikaji pada penelitian ini meliputi :

- 1) Bagaimana kandungan klorin (Cl) dan kandungan logam berat pada *Refuse Derived Fuel* (RDF) yang dihasilkan oleh TPST Sendangsari ?
- 2) Bagaimana kandungan klorin (Cl) dan kandungan logam berat pada abu dasar (*bottom ash*) hasil pembakaran dalam proses *rotary drying* di TPST Sendangsari ?
- 3) Bagaimana dampak lingkungan dari *Refuse Derived Fuel* (RDF) dan abu dasar (*bottom ash*) hasil pembakaran dalam proses *rotary drying* di TPST Sendangsari.

1.3 Tujuan

Tujuan pada penelitian ini disesuaikan dengan rumusan masalah yang telah dijelaskan, meliputi :

- 1) Menentukan kandungan klorin (Cl) dan kandungan logam berat serta karakteristik pada *Refuse Derived Fuel* (RDF) yang dihasilkan oleh TPST Sendangsari

- 2) Menentukan kandungan klorin (Cl) dan kandungan logam berat serta karakteristik pada abu dasar (*bottom ash*) hasil pembakaran dalam proses *rotary drying* di TPST Sendangsari
- 3) Mengetahui dampak lingkungan dari *Refuse Derived Fuel* (RDF) dan abu dasar (*bottom ash*) hasil pembakaran dalam proses *rotary drying* di TPST Sendangsari.

1.4 Manfaat

Manfaat dilakukannya penelitian ini di antaranya :

- 1) Dapat menjadi salah satu referensi ilmiah dan akademik terutama dalam bidang teknik lingkungan yang berfokus pada pengolahan sampah dengan teknologi *Refuse Derived Fuel* (RDF) dan pengurangan kadar air (pengeringan) menggunakan *rotary drying*.
- 2) Memberikan data dan informasi kepada pihak TPST Sendangsari mengenai karakteristik *Refuse Derived Fuel* (RDF) dan abu dasar (*bottom ash*) yang dihasilkan dalam proses *rotary drying* untuk memastikan keamanan penggunaan dan dampaknya terhadap lingkungan.

1.5 Ruang Lingkup

Ruang lingkup dalam penelitian ini sebagai berikut :

- 1) Penelitian dilakukan di Tempat Pengolahan Sampah Terpadu (TPST) Sendangsari, yang berlokasi di kapanewon Minggir, Kabupaten Sleman, D.I. Yogyakarta.
- 2) Data penelitian ini merupakan data primer yang diperoleh secara langsung melalui proses pengambilan sampel di lapangan dan pengujian di laboratorium.
- 3) Sampel RDF yang diidentifikasi merupakan hasil campuran sampah di TPST Sendangsari yang mudah terbakar, sedangkan sampel abu yang di analisis merupakan abu sisa hasil pembakaran sampah menggunakan *rotary drying*.

- 4) Sampel *Refuse Derived Fuel* (RDF) yang diidentifikasi meliputi RDF basah dan RDF kering, sedangkan sampel abu hasil pembakaran yang diidentifikasi meliputi abu dasar (*bottom ash*).
- 5) Analisis sampel *Refuse Derived Fuel* (RDF) yang dilakukan mencakup dua parameter, yaitu kandungan klorin (Cl) dan kandungan logam berat, meliputi Timbal (Pb), Besi (Fe), Kadmium (Cd), Kromium (Cr) dan Seng (Zn).
- 6) Analisis sampel abu dasar (*bottom ash*) hasil pembakaran yang dilakukan mencakup mencakup dua parameter, yaitu kandungan klorin (Cl) dan kandungan logam berat, meliputi Timbal (Pb), Besi (Fe), Kadmium (Cd), Kromium (Cr) dan Seng (Zn).
- 7) Pengujian sampel dilakukan di Laboratorium Kualitas Lingkungan FTSP UII, dengan menggunakan instrumen *Atomic Absorption Spectrophotometer* (AAS) dan Spektrofotometer UV-Vis.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Profil TPST Sendangsari

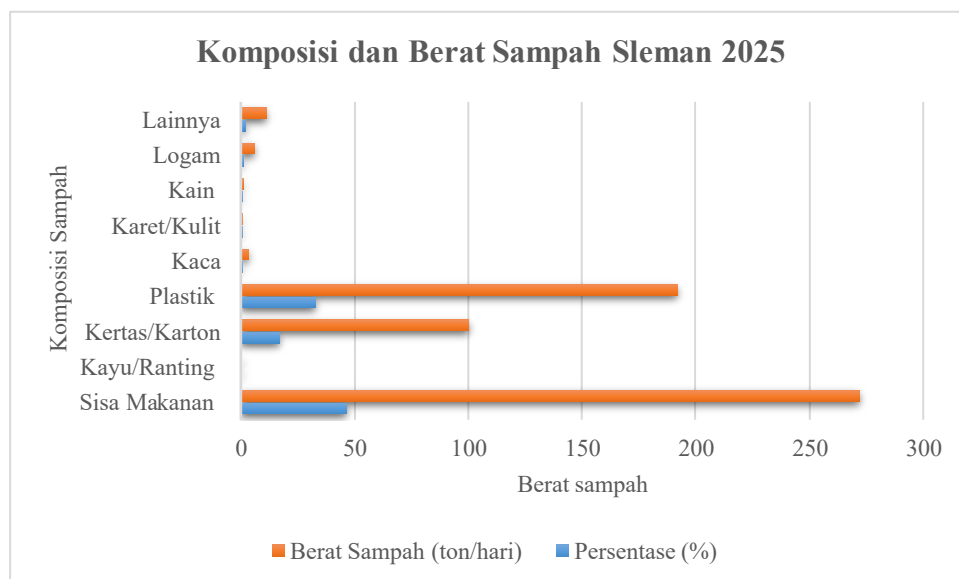
Tempat Pengolahan Sampah Terpadu (TPST) Sendangsari merupakan salah satu tempat pengolahan sampah yang berada di kapanewon Minggir, kabupaten Sleman, Yogyakarta. TPST Sendangsari dibangun oleh Pemerintah Kabupaten Sleman sebagai bagian upaya membantu pengelolaan sampah dan penerapan konsep *waste-to-energy* dengan mengelola sampah menjadi *Refuse Derived Fuel* (RDF), dimana sampah tidak hanya berakhir di landfill namun memberikan nilai lebih sebagai bahan bakar energi terbarukan yang mendukung keberlanjutan. TPST Sendangsari dibangun di atas Tanah Kas Desa (TKD) dengan luas lahan sekitar 6.600 m^2 . TPST Sendangsari berada di bawah pengawasan Dinas Lingkungan Hidup (DLH) Kabupaten Sleman.

TPST Sendangsari melakukan uji coba pengolahan sampah pada awal maret 2024, dengan kapasitas awal pengolahan sebesar 5 ton/ hari (Kristyani, 2024). TPST ini beroperasi sepenuhnya pada April 2024 dengan wilayah pelayanan mencakup wilayah Sleman bagian Barat. TPST Sendangsari memiliki kapasitas pengelolaan sampah berkisar antara 20 – 40 ton sampah perhari dari total produksi sampah di Sleman. TPST Sendangsari menjadi salah satu sarana pengelolaan sampah yang menjadi salah satu solusi dalam mengatasi timbulan sampah yang terus bertambah. TPST Sendangsari juga memanfaatkan teknologi *rotary drying* untuk melakukan pengeringan.

Berdasarkan data Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (SIPSN) pada tahun 2025 timbulan sampah harian di kabupaten Sleman mencapai 585,3 ton perhari, dengan komposisi sampah yang dapat dilihat pada Tabel 2.1 dan Gambar 2.1 berikut.

Tabel 2. 1 Jumlah Timbulan dan Komposisi Sampah di Sleman Tahun 2025

Tahun 2025				
No.	Timbulan Sampah (ton/hari)	Komposisi Sampah	Persentase (%)	Berat Sampah (ton/hari)
1	585,3	Sisa Makanan	46,49	272,11
2		Kayu/Ranting	0	0
3		Kertas/Karton	17,08	99,97
4		Plastik	32,77	191,80
5		Kaca	0,57	3,34
6		Karet/Kulit	0,03	0,18
7		Kain	0,16	0,94
8		Logam	0,99	5,79
9		Lainnya	1,91	11,18



Gambar 2. 1 Grafik Komposisi dan Berat Sampah di Sleman Tahun 2025

2.2 Tempat Pengolahan Sampah Terpadu (TPST) Sendangsari

Menurut UU No. 18 Tahun 2008, Tempat Pengolahan Sampah Terpadu (TPST) merupakan tempat dilaksanakannya kegiatan pengumpulan, pemilahan, penggunaan ulang, pendauran ulang, pengolahan, dan pemrosesan akhir sampah. TPST umumnya menerapkan prinsip 3R, yaitu *Reduce*, *Reuse* dan *Recycle*. Selain itu juga berfungsi sebagai infrastruktur untuk memperbaiki kualitas sampah (menurunkan kadar air/organik pada fraksi kering) dan mengurangi volume sampah

yang masuk ke Tempat Pemrosesan Akhir (TPA). TPST memiliki peran dan fungsi yang sangat penting karena di TPST mencakup beberapa hal, meliputi kegiatan pengurangan dan penanganan sampah, bahkan kegiatan pemrosesan akhir dapat dilakukan di TPST, sehingga sampah yang harus dibuang ke TPA menjadi berkurang.

2.3 Pengertian Sampah

Menurut Peraturan Pemerintah Nomor 27 Tahun 2020 sampah merupakan sisa kegiatan sehari – hari manusia dan atau proses alam yang berbentuk padat. Sedangkan menurut SNI 19-2454-2002, sampah dapat didefinisikan sebagai limbah yang bersifat padat terdiri dari bahan organik dan bahan anorganik yang dianggap sudah tidak berguna lagi dan harus dikelola agar tidak membahayakan lingkungan. Menurut Undang - Undang Nomor 18 Tahun 2008, sumber sampah merupakan asal timbulan sampah yang dihasilkan oleh setiap orang dan/atau akibat proses alam yang menghasilkan timbulan sampah. Timbulan sampah nantinya akan dikelola secara sistematis, menyeluruh dan berkesinambungan yang meliputi pengurangan dan penanganan. Timbulan sampah kemudian akan ditampung sementara sebelum diangkut ke tempat pengolahan terpadu untuk kegiatan pengumpulan, pemilahan, penggunaan ulang, pendauran ulang, pengolahan dan pemrosesan akhir sampah.

2.4 Jenis dan Karakteristik Sampah

Secara umum jenis – jenis sampah terbagi menjadi tiga jenis, yaitu sampah organik, sampah anorganik, dan sampah B3 (Bahan Berbahaya dan Beracun). Sampah organik merupakan sampah yang dihasilkan oleh makhluk hidup seperti manusia, hewan, dan tumbuhan yang dapat diuraikan oleh alam. Sedangkan sampah anorganik merupakan sampah hasil pabrik industri yang memerlukan waktu lama hingga puluhan tahun agar dapat terurai (Batubara, dkk., 2022).

a. Sampah Organik

Sampah organik merupakan sampah yang mudah terurai secara biologis oleh mikroorganisme. Sampah organik banyak dihasilkan dari sisa makanan, sampah dapur, dan sampah kebun. Sampah organik merupakan

jenis sampah dengan timbunan dihasilkan cukup tinggi, dapat mencapai 50%-70% dari total sampah padat perkotaan (Rahmat, dkk., 2024). Sampah organik dapat dimanfaatkan kembali dan memiliki nilai ekonomi jika dilakukan pengolahan dengan metode komposting. Karakteristik dari sampah organik memiliki kadar air tinggi dan mudah membusuk sehingga sangat cocok untuk penerapan komposting.

b. Sampah Anorganik

Sampah anorganik merupakan jenis sampah yang sulit terurai dan membutuhkan waktu sangat lama untuk dapat terurai secara alami. Jenis sampah anorganik berupa sampah plastik, botol, kaleng minuman, serta kemasan makanan. Meski sulit terurai, namun sampah anorganik memiliki karakteristik kadar air rendah dan nilai kalor tinggi. Sehingga dapat didaur ulang (*recycle*) dan memiliki potensi nilai jual yang relatif tinggi. Selain itu, melalui pengolahan tertentu dapat dimanfaatkan menjadi bahan bakar alternatif atau *Refuse Derived Fuel* (RDF).

c. Sampah B3 (Bahan Berbahaya dan Beracun)

Sampah Bahan Berbahaya dan Beracun atau yang kita kenal sampah B3, merupakan jenis sampah yang mengandung zat-zat berbahaya baik bagi manusia maupun lingkungan. Sampah B3 memerlukan perlakuan khusus dan memiliki risiko tinggi apabila tidak dikelola dengan baik. Jenis sampah B3 berupa baterai bekas, lampu bekas, cat, serta limbah medis. Pengelolaan sampah B3 masih belum optimal dan masih banyak ditemukan bercampur dengan sampah organik maupun anorganik.

2.5 Kandungan Klorin (Cl)

Klorin (Cl) merupakan salah satu parameter yang penting pada sampah dan abu sisa pembakaran. Pada sampah atau RDF kandungan klorin dapat berpengaruh pada kualitas RDF itu sendiri. Selain itu dapat berpotensi membentuk senyawa yang berbahaya seperti dioksin. Pada sampah RDF klorin dapat ditemukan atau terkandung dalam sampah plastik berbasis PVC (*polyvinyl chloride*) dan limbah rumah tangga. Pada abu sisa pembakaran juga dapat mengandung klorin, karena

sebagian unsur klorin dapat terakumulasi pada abu dasar (*bottom ash*). Kandungan klorin yang tinggi pada abu dapat menyebabkan bahaya lingkungan maupun kesehatan, apalagi jika hanya dibuang tanpa pengelolaan lebih lanjut. Kandungan klorin yang tinggi juga dapat meningkatkan emisi Hidrogen Klorida (HCl) pada saat proses pembakaran. Menurut PermenLHK Nomor P.70/MENLHK/SETJEN/KUM.1/8 Tahun 2016 tentang baku mutu emisi usaha dan/atau kegiatan pengolahan sampah secara termal, emisi gas asam seperti Hidrogen Klorida (HCl) harus dikendalikan menggunakan pengendalian pencemaran udara (*Air Pollution Control*).

2.6 Refuse Derived Fuel (RDF)

Kegiatan pengelolaan sampah harus ditingkatkan dalam meminimalkan dampak yang dapat ditimbulkan, tidak hanya sistem penanganan saja namun juga perlu penggunaan teknologi yang ramah lingkungan. Salah satu teknologi yang saat ini mulai banyak dikembangkan dalam meningkatkan energi terbarukan yaitu teknologi *Refuse Derived Fuel* (RDF) atau bahan bakar jumputan padat (Maulidayanti, dkk., 2024).

Refuse Derived Fuel (RDF) merupakan bahan bakar padat yang diproses melalui penekanan dengan bahan baku yang terdiri dari sampah organik dan sampah anorganik. RDF ini merupakan hasil pemilahan limbah padat pada fraksi sampah yang memiliki karakteristik mudah terbakar serta tidak mudah terbakar. Pada umumnya komposisi RDF terdiri dari kertas, plastik, kain, kayu dan bahan organik. Secara umum proses pembuatan RDF meliputi beberapa tahapan diantaranya, yaitu persiapan bahan baku, pemilahan sampah, analisis komposisi, dan pembuatan RDF (Dewi, dkk., 2025).

Pengumpulan bahan baku yang akan diolah menjadi RDF berupa sampah 4K1P (kertas, kayu, kain, karet/kulit dan plastik) yang dikumpulkan pada wadah terpisah (Rania, dkk., 2019). Penggunaan bahan bakar RDF berperan sebagai pengganti bahan bakar fosil serta mendukung pengurangan emisi karbon dan transisi energi. Kualitas RDF yang dihasilkan sangat bergantung pada karakteristik sampah yang menjadi bahan dasar pembuatan, parameter – parameter seperti kadar

abu, nilai kalor, serta kandungan unsur kimia lainnya juga menjadi faktor penting terhadap kelayakan dan efisiensi RDF sebagai bahan bakar alternatif.

2.7 Abu Dasar (*Bottom Ash*)

Abu Dasar (*Bottom Ash*) merupakan sisa pembakaran atau residu yang dihasilkan dari proses pembakaran sampah atau limbah padat pada mesin *rotary drying*. Abu dasar yang dihasilkan pada proses pembakaran pada mesin *rotary drying* sama seperti abu yang dihasilkan dari pembakaran menggunakan insinerator. Secara umum, abu insinerator dapat dibedakan menjadi dua jenis, yaitu abu yang jatuh dan terkumpul pada dasar tungku pembakaran atau *bottom ash* dan abu terbang yang terbawa aliran gas buang atau *fly ash*. Karakteristik pada abu sisa pembakaran, baik menggunakan *rotary drying* maupun insinerator yang dihasilkan bergantung pada jenis sampah atau limbah yang dibakar, serta suhu selama proses pembakaran. Umumnya pembakaran pada insinerator dilakukan pada suhu tinggi mencapai 800 – 1.200 derajat celcius (SNI 8423, 2017).

2.8 Logam berat (*Heavy Metal*)

Logam berat merupakan salah satu parameter penting pada pengujian sampah RDF dan abu sisa pembakaran. Keberadaan logam berat pada sampah dapat berasal dari bahan – bahan berbahaya seperti tekstil, cat, baterai, yang tercampur menjadi satu. Logam berat dapat terlepas ke udara saat proses pembakaran, namun tidak semua lepas ke udara melainkan ada yang tertinggal pada residu abu pembakaran. Pengelolaan residu hasil pembakaran yang mengandung logam berat, maka termasuk dalam limbah Bahan Berbahaya dan Beracun (B3) dan terdapat peraturan pengelolaan dalam Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang penyelenggaraan perlindungan dan pengelolaan lingkungan hidup. Selain itu, pada RDF jika akan digunakan lebih lanjut pada industri seperti industri semen maka harus memenuhi baku mutu. Berdasarkan PermenLHK Nomor 19 Tahun 2017 tentang Baku Mutu Emisi Bagi Usaha dan/atau Kegiatan Industri Semen, baku mutu emisi sumber tidak bergerak yang menggunakan *Refuse Derived Fuel* (RDF) untuk bahan bakar alternatif sebagai berikut pada Tabel 2.2 berikut.

Tabel 2. 2 Baku Mutu Emisi Usaha Menggunakan RDF

No	Parameter	Satuan	Nilai Baku Mutu Emisi
1	Partikulat	mg/Nm ₃	60
2	Sulfur Dioksida (SO ²)	mg/Nm ₃	650
3	Nitrogen Oksida (NO _x)	mg/Nm ₃	800
4	Hidrogen Fluorida (HF)	mg/Nm ₃	2
5	Hidrogen Klorida (HCl)	mg/Nm ₃	20
6	Karbon Monoksida (CO)	mg/Nm ₃	625
7	Cadmium (Cd)	mg/Nm ₃	0,2
8	Merkuri (Hg)	mg/Nm ₃	0,2
9	Lead (Pb)	mg/Nm ₃	5
10	Arsenik (As)	mg/Nm ₃	1
11	Nikel (Ni)	mg/Nm ₃	0,5
12	PCDD / F (Dioxin dan Furan)	ng TEQ/Nm ₃	0,1

Sumber: PermenLHK Nomor 19 Tahun 2017 Lampiran III

Kualitas *Refuse Derived Fuel* (RDF) untuk dimanfaatkan sebagai bahan bakar alternatif pada industri semen diatur dalam standar *European Norm* atau EN 15359 : 2011. Standar ini merupakan standar Eropa yang diterbitkan oleh *European Committee for Standardization* (CEN) mengenai kualitas *Solid Recovered Fuel* (SRF) berdasarkan nilai kalor, kandungan klorin dan kandungan merkuri. Tabel klasifikasi SRF sesuai dengan standar EN 15359 : 2011 dapat dilihat pada Tabel 2.3 berikut.

Tabel 2. 3 Kualitas SRF berdasarkan standar EN 15359 : 2011

Karakteristik	Satuan	Kelas				
		1	2	3	4	5
Nilai kalor bebas (NCV)	MJ/kg	≥ 25	≥ 20	≥ 15	≥ 10	≥ 3
Kandungan klorin (Cl)	%	≤ 0,2	≤ 0,6	≤ 1,0	≤ 1,5	≤ 3
Kandungan merkuri (Hg)	Mg/MJ	≤ 0,02	≤ 0,03	≤ 0,08	≤ 0,15	≤ 0,50

2.9 Penelitian Terdahulu

No.	Sumber (Penulis, Tahun)	Judul	Objek atau Lokasi Penelitian	Hasil Penelitian	Keterbatasan Penelitian	Keterkaitan dengan penelitian lain	Relevansi dengan penelitian yang akan dilakukan
1	Sarquah, et.al., (2023)	<i>Characterization of Municipal Solid Waste and Assessment of Its Potential for Refuse-Derived Fuel (RDF) Valorization</i>	Fasilitas pengolahan sampah di Accra dan Kumasi, Ghana	RDF dari fraksi residu memiliki nilai kalor 28,66 – 30,24 Mj/kg (tanpa organik) dan 19,73 – 23,75 Mj/kg (dengan organik). Kandungan klorin dan logam berat memenuhi standar EN 15359. Potensi produksi 12 – 57 kt/tahun (12.000 – 57.000 ton/tahun) dan mampu menggantikan 10% – 30% konsumsi batubara industri.	Penelitian ini berbasis studi kasus regional (Ghana), sehingga karakteristik RDF sangat dipengaruhi oleh komposisi sampah lokal. Dalam penelitian ini juga tidak membahas aspek teknis pembakaran secara detail.	Penelitian ini menguatkan penelitian lainnya terkait RDF sebagai alternatif bahan bakar industri semen dan konsep <i>circular economy</i> .	Penelitian ini dapat menjadi dasar penting dalam analisis kadar kalor pada RDF dan evaluasi kelayakan sebagai bahan bakar alternatif di industri semen, dan juga sebagai pembanding nilai kalor dan parameter kualitas RDF.

No.	Sumber (Penulis, Tahun)	Judul	Objek atau Lokasi Penelitian	Hasil Penelitian	Keterbatasan Penelitian	Keterkaitan dengan penelitian lain	Relevansi dengan penelitian yang akan dilakukan
2	Salaripoor, et.al., (2025)	<i>Life Cycle Environmental Assessment of Refuse-Derived Fuel (RDF) as an Alternative to Fossil Fuels in Cement Production : A Sustainable Approach for Mitigating Carbon Emissions</i>	Industri semen di Tehran, Iran	Penggunaan RDF (terutama yang mengandung fraksi organik) menurunkan <i>Global Warming Potential</i> (GWP) secara signifikan dibandingkan dengan <i>fuel oil</i> dan batubara. RDF berpotensi menekan emisi CO ₂ dan meningkatkan keberlanjutan energi industri semen.	Analisis yang dilakukan berbasis simulasi OpenLCA, serta tidak mengevaluasi aspek teknis kualitas abu hasil dari pembakaran RDF.	Penelitian ini mendukung penelitian global terutama mengenai dekarbonisasi industri semen melalui substitusi bahan bakar fosil.	Penelitian ini dapat memperkuat urgensi penelitian yang akan dilakukan terkait analisis kadar kalor dan implikasinya terhadap emisi pada industri semen.
3	Zhang, et.al., (2025)	<i>Study of municipal solid waste</i>	China	Substitusi optimal 20% <i>bottom ash</i>	Analisis berfokus pada material	Penelitian ini sejalan dengan	Penelitian ini relevan dengan penelitian yang

No.	Sumber (Penulis, Tahun)	Judul	Objek atau Lokasi Penelitian	Hasil Penelitian	Keterbatasan Penelitian	Keterkaitan dengan penelitian lain	Relevansi dengan penelitian yang akan dilakukan
		<i>incinerator bottom ash (MSWIBA) and coal fly ash (CFA) applied to concrete pavement bricks : Mechanical properties, microstructure, durability.</i>		(MSWIBA) dan 10% <i>fly ash</i> (CFA) menghasilkan kuat tekan sebesar 52,8 MPa. Kandungan logam berat dalam batas aman, serta struktur pori dan daya tekan meningkat.	konstruksi, bukan pada karakteristik awal abu sebagai limbah hasil pembakaran.	tren mengenai pemanfaatan residu insinerasi dalam konstruksi untuk mengurangi beban landfill.	akan dilakukan mengenai analisis kandungan logam berat pada bottom ash dan bagaimana potensi pemanfaatannya setelah dilakukan uji karakteristik.
4	Vele, et.al., (2025)	Pengelolaan berkelanjutan abu terbang hasil pembakaran sampah kota : Tinjauan berdasarkan	Studi komparatif teknologi pengolahan abu terbang (<i>fly ash</i>)	Hasil penelitian menunjukkan Abu terbang (<i>fly ash</i>) mengandung logam berat tinggi terutama Zn dan Pb, yaitu 56,652 mg/kg dan	Tidak membahas karakteristik awal RDF sebelum pembakaran, serta penelitian ini hanya berfokus pada <i>fly ash</i> bukan <i>bottom</i>	Penelitian ini mengintegrasikan aspek teknis, lingkungan, serta ekonomi dalam pengelolaan abu insinerator,	Penelitian ini dapat menjadi pendukung alasan pentingnya dilakukan pengujian logam berat pada abu pembakaran RDF untuk memastikan keamanan

No.	Sumber (Penulis, Tahun)	Judul	Objek atau Lokasi Penelitian	Hasil Penelitian	Keterbatasan Penelitian	Keterkaitan dengan penelitian lain	Relevansi dengan penelitian yang akan dilakukan
		penilaian siklus hidup jalur pengolahan dan valorisasi.		10,775 mg/kg. Penggunaan abu terbang vitrifikasi dalam produksi semen mengurangi GWP hingga 25% dan NREC sebesar 55%.	ash.	terutama abu terbang (<i>fly ash</i>).	lingkungan dan peluang pemanfaatannya.
5	Dewi, et.al., (2025)	Uji Karakteristik Pelet <i>Refuse Derived Fuel</i> (RDF) Hasil Proses Pengolahan Sampah Menggunakan Pelletizer	Karakteristik Pelet RDF (Cilacap)	Hasil penelitian menunjukkan proses <i>biodrying</i> dan <i>pelletizing</i> pada RDF di Cilacap efektif menurunkan kadar air dan menghasilkan nilai kalor sebesar 14-16 MJ/kg yang telah	Tidak mengkaji karakteristik abu hasil pembakaran RDF, hanya berfokus pada parameter fisik dan nilai kalor pada RDF.	Penelitian ini dapat mendukung penelitian global yang berfokus pada peningkatan kualitas RDF melalui <i>biodrying</i> dan <i>pelletizer</i> untuk	Penelitian ini dapat menjadi pembanding dan menjadi data pendukung dalam analisis kadar kalor pada RDF yang dihasilkan di TPST Sendangsari.

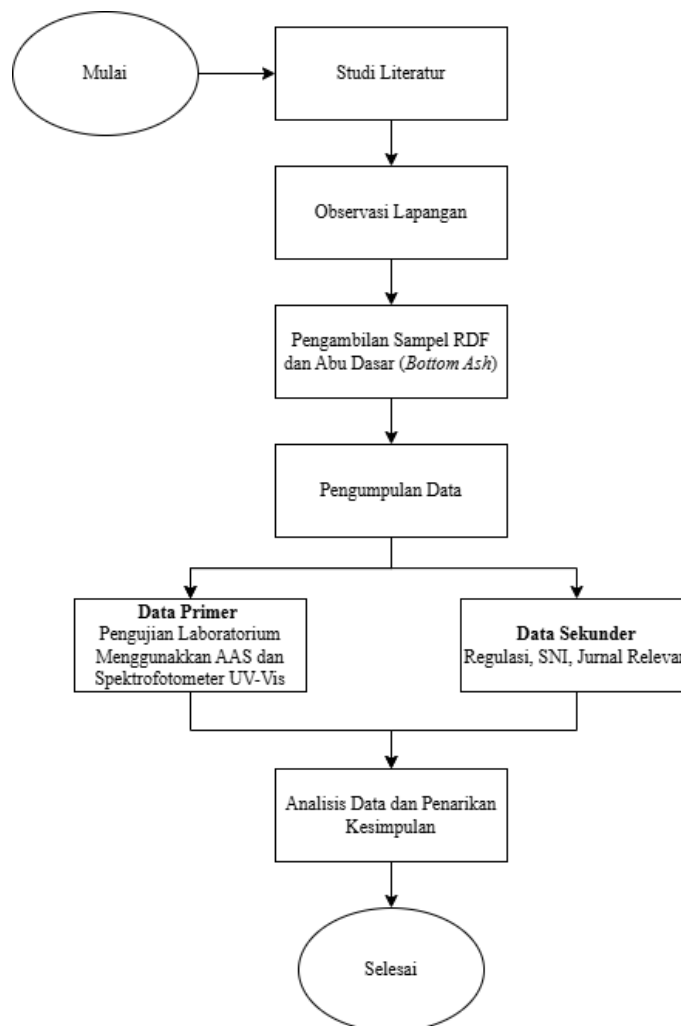
No.	Sumber (Penulis, Tahun)	Judul	Objek atau Lokasi Penelitian	Hasil Penelitian	Keterbatasan Penelitian	Keterkaitan dengan penelitian lain	Relevansi dengan penelitian yang akan dilakukan
				memenuhi kriteria bahan bakar alternatif industri semen.		mendapatkan nilai kalor optimal sebagai bahan bakar alternatif.	

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Kerangka Penelitian

Kerangka penelitian berisi tahapan-tahapan dalam memperoleh data yang bertujuan untuk memberikan gambaran mengenai proses yang dilakukan selama penelitian dilakukan. Tahapan dalam penelitian kali ini dapat dilihat pada Gambar 3.1 berikut.



Gambar 3. 1 Skema Kerangka Penelitian

3.2 Pengumpulan Data

3.2.1. Data

Pada penelitian ini data yang dikumpulkan merupakan data primer dan data sekunder, yaitu data yang diperoleh secara langsung dari lapangan serta regulasi dan jurnal relevan. Dalam penelitian kali ini, data primer diperoleh melalui pengujian laboratorium terhadap karakteristik *Refuse Derived Fuel* (RDF) dan Abu dasar (*Bottom Ash*) sisa pembakaran sampah dengan *rotary drying* dari TPST Sendangsari serta melalui wawancara langsung kepada pihak TPST Sendangsari. Data sekunder diperoleh melalui literatur jurnal relevan, regulasi, serta standar nasional Indonesia (SNI). Pengujian yang dilakukan pada penelitian ini meliputi tiga sampel dengan dua parameter uji, yaitu :

Tabel 3. 1 Sampel dan Parameter uji

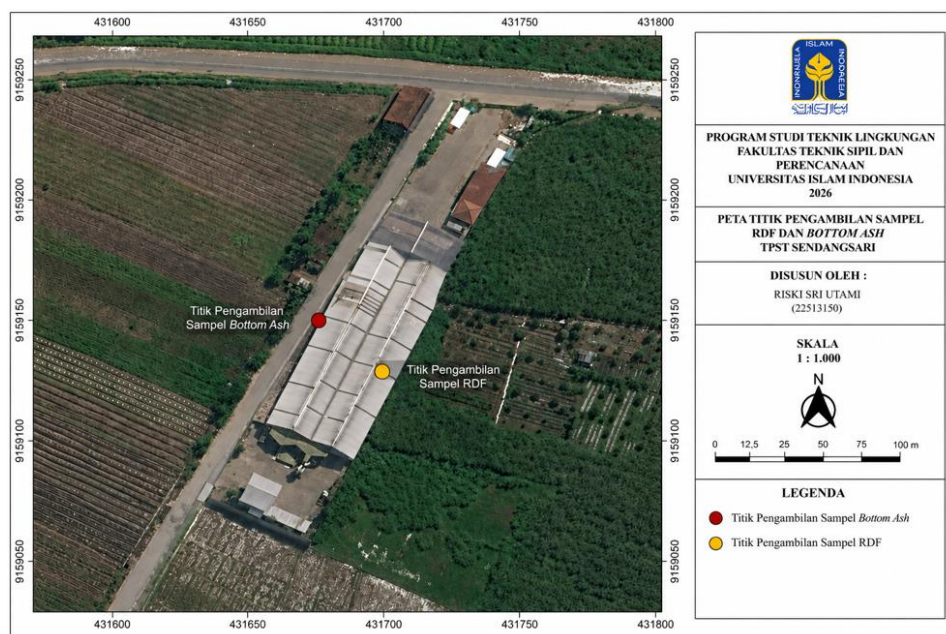
No	Sampel uji	Parameter uji
1.	<i>Refuse Derived Fuel (RDF)</i>	
	RDF Baru (<i>Fresh RDF</i>)	- Kandungan klorin (Cl) - Logam berat Timbal (Pb), Besi (Fe), Kadmium (Cd), Kromium (Cr) dan Seng (Zn).
	RDF Tersimpan	
2.	<i>Abu Rotary Drying</i>	
	<i>Bottom Ash</i>	- Kandungan klorin (Cl) - Logam berat Timbal (Pb), Besi (Fe), Kadmium (Cd), Kromium (Cr) dan Seng (Zn).

RDF Baru (*Fresh RDF*) merupakan RDF yang baru selesai diproduksi pada hari itu, sedangkan RDF Tersimpan merupakan RDF yang sudah diproduksi dan disimpan tidak pada hari yang sama. Pengambilan sampel dengan menggunakan

grab sampling yaitu metode pengambilan sampel sekali ambil pada satu titik dan satu waktu tertentu untuk mewakili kondisi sampel saat itu. Metode ini digunakan untuk mengetahui kondisi sampel pada saat proses pengolahan berlangsung, sehingga dapat merepresentasikan sampel RDF yang diproduksi di TPST Sendangsari.

3.2.2. Lokasi dan Waktu

Lokasi penelitian ini dilakukan di TPST Sendangsari yang berlokasi di kalurahan Sendangsari kapanewon Minggir, Kabupaten Sleman, Yogyakarta. Lokasi penelitian ini dipilih karena TPST Sendangsari merupakan salah satu fasilitas pengolahan sampah di kabupaten Sleman yang telah menerapkan pemanfaatan sampah kembali (*recycle*) menjadi *Refuse Derived Fuel* (RDF). RDF yang dihasilkan dimanfaatkan menjadi bahan bakar alternatif pada industri semen, PT. Solusi Bangun Indonesia (SBI) Cilacap. Lokasi dan titik pengambilan sampel dapat dilihat pada Gambar 3.2 berikut.



Gambar 3. 2 Peta Titik Pengambilan Sampel di TPST Sendangsari

Pengambilan sampel dilakukan pada dua titik, yaitu titik pengambilan sampel RDF yang berada pada area pengolahan RDF dan titik pengambilan sampel abu dasar (*bottom ash*) pada area pembuangan residu hasil pembakaran. Residu hasil pembakaran tidak disimpan pada wadah penyimpanan tertentu, namun hanya

diletakkan disamping area pengolahan sampah yang hanya bersekat dinding. Waktu pengambilan sampel dilakukan pada tanggal Desember 2025 pada saat jam kerja operasional TPST. Pengambilan sampel dilakukan pada jam kerja TPST Sendangsari untuk mendapatkan sampel yang merepresentasikan kualitas RDF dan abu dasar (*bottom ash*) yang dihasilkan pada operasional harian, sehingga data yang diperoleh dapat lebih akurat.

3.2.3. Alat dan Bahan

Alat yang digunakan untuk pegujian laboratorium pada penelitian ini adalah *Furnace*, *Atomic Absorption Spectrofotometry* (AAS) . *Furnace* merupakan alat atau instrumen yang digunakan untuk pembakaran sampel dengan suhu tinggi. Alat ini berfungsi untuk pengabuan atau mengubah sampel menjadi abu dengan pemanasan suhu tinggi. *Furnace* pada laboratorium digunakan untuk pengujian kadar abu, dengan suhu tinggi dan waktu yang cukup lama (3 – 4 jam) untuk proses pengabuan. *Furnace* baru boleh dibuka sehari setelah penggunaan, untuk mendinginkan alat terlebih dahulu setelah penggunaan suhu yang tinggi.

Atomic Absorption Spectrofotometry (AAS) merupakan instrumen yang digunakan untuk mengetahui kandungan logam berat pada suatu bahan atau sampel uji. Prinsip analisis kandungan logam berat dengan instrumen AAS dengan pengukuran berdasarkan jumlah radiasi yang diserap oleh atom ketika sejumlah radiasi menembus sistem yang mengandung atom (Zahro, dkk., 2023). AAS ini merupakan salah satu metode analisis yang dapat digunakan untuk mengetahui kandungan atau unsur-unsur dalam suatu sampel, serta dapat dapat menganalisis sejumlah sampel kecil dengan panjang gelombang tertentu. Metode ini memiliki beberapa kelebihan berupa kepekaan, keakuratan, dan selektivitas yang tinggi (Anggitami, dkk., 2021).

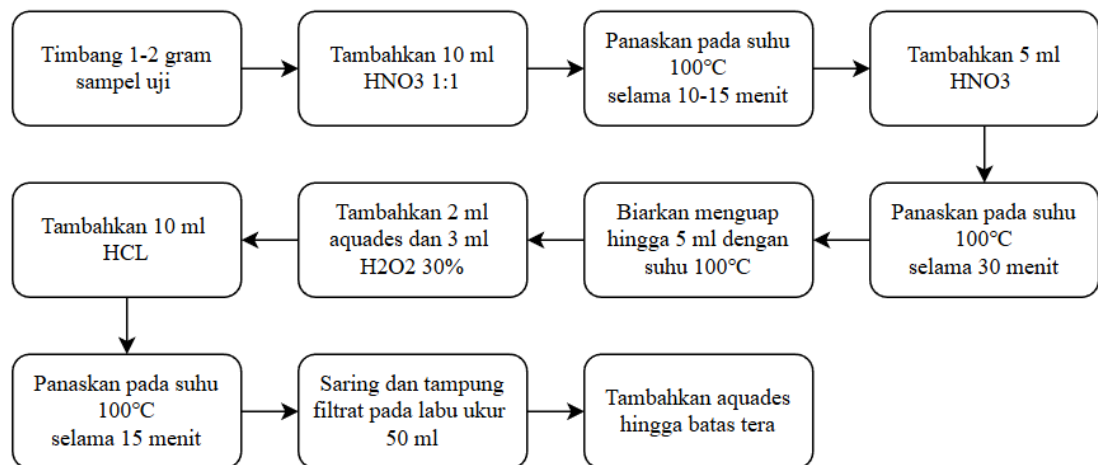
Bahan yang digunakan pada penelitian ini meliputi 3 sampel, yaitu 2 sampel *Refuse Derived Fuel* (RDF) yaitu RDF Baru (*Fresh RDF*) dan RDF Tersimpan, dan 1 sampel Abu sisa pembakaran (*Bottom Ash*). Sampel RDF dan Abu sisa pembakaran (*Bottom Ash*) diambil di Tempat Pengolahan Sampah Terpadu (TPST) Sendangsari yang berlokasi di Minggir, Kabupaten Sleman.

3.3 Analisis Data

3.3.1 Analisis Kandungan Logam Berat

Analisis kandungan logam berat (Timbal (Pb), Besi (Fe), Kadmium (Cd), Kromium (Cr) dan Seng (Zn) pada sampel RDF dan *Bottom Ash* mengacu pada Standar Nasional Indonesia (SNI 13-8910-2021). Pengujian sampel dilakukan dengan menggunakan instrumen uji *Atomic Absorption Spectrofotometry* (AAS) atau Spektrofotometer Serapan Atom (SSA). Pengujian kandungan logam berat pada sampel uji dilakukan secara duplo atau dua kali pengulangan pengujian dengan sampel dan prosedur yang sama, dengan tujuan untuk mendapatkan hasil uji yang lebih valid.

Sebelum analisis, dilakukan preparasi sampel RDF dan *Bottom Ash* terlebih dahulu melalui pengeringan dan destruksi asam. Pengeringan sampel dilakukan menggunakan oven yang bertujuan untuk menghilangkan kadar air. Kemudian sampel dimasukkan ke *Furnace* dengan suhu 800°C selama 3 jam sebelum di destruksi asam. Destruksi asam merupakan metode pelarutan contoh uji dengan menambahkan asam dan pemanasan hingga analit dalam contoh uji larut dengan sempurna. Logam dalam bentuk senyawa organik dan anorganik yang tidak larut dalam air di destruksi dengan campuran asam nitrat (HNO_3) dan hidrogen peroksida (H_2O_2) hingga membentuk logam yang terlarut (SNI 8910 : 2021). Logam terlarut kemudian dilakukan pengujian menggunakan Spektrofotometri Serapan Atom (SSA) -Nyala. Tahap destruksi asam ini bertujuan untuk melarutkan logam dalam bentuk ion untuk memudahkan analisis menggunakan SSA-Nyala. Langkah-langkah persiapan contoh uji dengan destruksi asam mengacu pada SNI 8910 : 2021 tentang cara uji kadar logam dalam contoh uji limbah padat, sedimen, dan tanah dengan metode destruksi asam menggunakan Spektrofotometer Serapan Atom (SSA)-Nyala yang dapat dilihat pada Gambar 3.2.



Gambar 3. 3 Langkah persiapan contoh uji dengan destruksi asam

3.3.2 Perhitungan Kandungan Logam Berat

Setelah dilakukan pengujian sampel dengan menggunakan Spektrofotometri Serapan Atom (SSA) -Nyala, kemudian dilakukan perhitungan kadar logam berdasarkan berat aktual sampel uji dengan rumus perhitungan mengacu pada SNI 8910 : 2021.

- a. Jika kadar logam dilaporkan berdasarkan berat aktual sampel uji, maka kadar logam dapat dihitung menggunakan rumus berikut :

$$\text{Kadar logam} \left(\frac{\text{mg}}{\text{kg}} \right) = \frac{c \times v}{w} \times fp$$

Keterangan :

c : konsentrasi sampel uji yang didapat dari SSA-Nyala (mg/L)

v : volume akhir setelah proses destruksi (mL)

w : berat sampel uji (gr)

fp : faktor pengenceran

- b. Jika kadar logam dilaporkan berdasarkan berat kering sampel uji, maka kadar logam dapat dihitung menggunakan rumus berikut :

$$Kadar\ logam\ \left(\frac{mg}{kg}\right) = \frac{c \times v}{w \times P} \times fp$$

Keterangan :

c : konsentrasi sampel uji yang didapat dari SSA-Nyala (mg/L)

v : volume akhir setelah proses destruksi (mL)

w : berat sampel uji (gr)

fp : faktor pengenceran

P : fraksi padat

Konsentrasi logam berat kromium (Cr) dan timbal (Pb) dalam sampel uji ditentukan berdasarkan persamaan linier dari kurva kalibraasi (Zahro, dkk., 2023).

$$Kadar\ Cr\ atau\ Pb\ \left(\frac{mg}{kg}\right) = \frac{C\ \left(\frac{mg}{L}\right)}{B\ (kg)} \times V\ (L)$$

Keterangan :

C : konsentrasi Cr atau Pb dalam sampel yang dihitung dari kurva kalibrasi (mg/L)

B : bobot sampel dari larutan uji(kg)

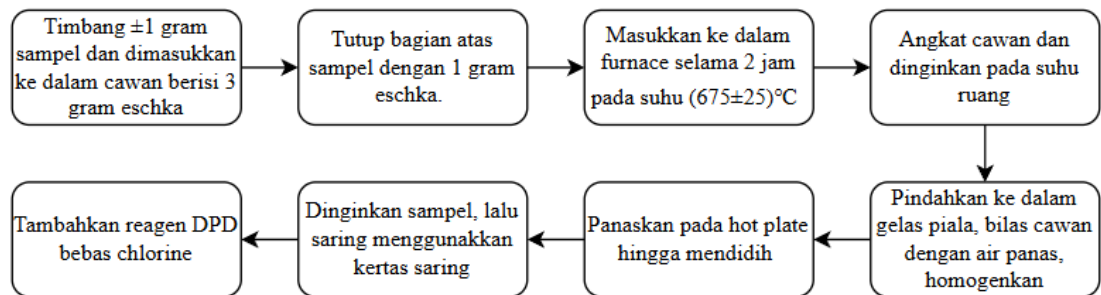
V : Volume larutan uji (gr)

3.3.3 Analisis Kandungan Klorin (Cl)

Analisis kandungan klorin (Cl) pada sampel RDF dan *Bottom Ash* mengacu pada Standar Nasional Indonesia (SNI) 8966 : 2021 tentang Bahan Bakar Jumpatan Padat untuk Pembangkit Listrik. Pengujian sampel dilakukan dengan menggunakan instrumen uji Spektrofotometer UV-Vis. Analisis kandunga klorin (Cl) pada RDF dengan menambahkan bubuk *Eschka* kemudian dimasukkan ke *Furnace* dengan suhu $(675 \pm 25)^{\circ}\text{C}$ selama 2 jam. Pada sampel abu dasar (*bottom ash*) juga perlu melalui *furnace* meskipun sudah dalam bentuk abu, karena ada penambahan bubuk *Eschka*.

Sampel yang telah menjadi abu kemudian dipindahkan ke dalam gelas piala dan dilakukan pemanasan pada *hot plate* hingga mendidih. Larutan sampel kemudian di tambahkan reagen DPD bebas *chlorine*, yang berfungsi untuk

mereaksikan klorin bebas dalam larutan sampel untuk memudahkan pembacaan pada Spektrofotometer UV-Vis. Langkah persiapan contoh uji klorin (Cl) dapat dilihat pada Gambar 3.3 berikut.



Gambar 3. 4 Langkah persiapan contoh uji klorin

3.3.4 Perhitungan Kandungan Klorin (Cl)

Perhitungan kandungan klorin (Cl) pada sampel menggunakan persamaan berikut :

$$Conc\ awal\ Cl\ (mg/L) = \left(\frac{(Abs - b)}{a} \right)$$

Keterangan :

Abs : nilai absorbansi pembacaan Spektrofotometer UV-Vis

b : intercept

a : slope

Kemudian untuk memperoleh konsentrasi akhir pada sampel menggunakan persamaan berikut :

$$Conc\ akhir\ Cl\ (mg/L) = \left(\frac{(Conc\ awal - blanko)}{Fp} \right)$$

Keterangan :

Fp : faktor pengenceran

Jika berdasarkan perhitungan kandungan klorin tinggi, menunjukkan bahwa kualitas RDF maupun Abu dapat berbahaya pada kesehatan dan dapat menyebabkan kerusakan alat (korosi).

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil

4.1.1 Kurva Kalibrasi dan Linearitas Metode AAS

Analisis kandungan logam berat pada *Refuse Derived Fuel* (RDF) dan *Bottom Ash* dengan metode *Atomic Absorption Spectrophotometry* (AAS) dimulai dengan pembuatan kurva kalibrasi pada setiap parameter logam berat, meliputi parameter seng (Zn), besi (Fe), kromium (Cr), kadmium (Cd), dan timbal (Pb), serta parameter klorin (Cl). Kurva kalibrasi diperoleh dari hubungan konsentrasi larutan standar dan nilai absorbansi yang dibaca oleh AAS. Melalui koefisien determinasi (R^2) dapat kita lihat dimana jika R^2 semakin mendekati angka satu, maka semakin efektif kurva kalibrasi tersebut dalam merepresentasikan hubungan antara kedua variabel (hubungan antara konsentrasi dan absorbansi).

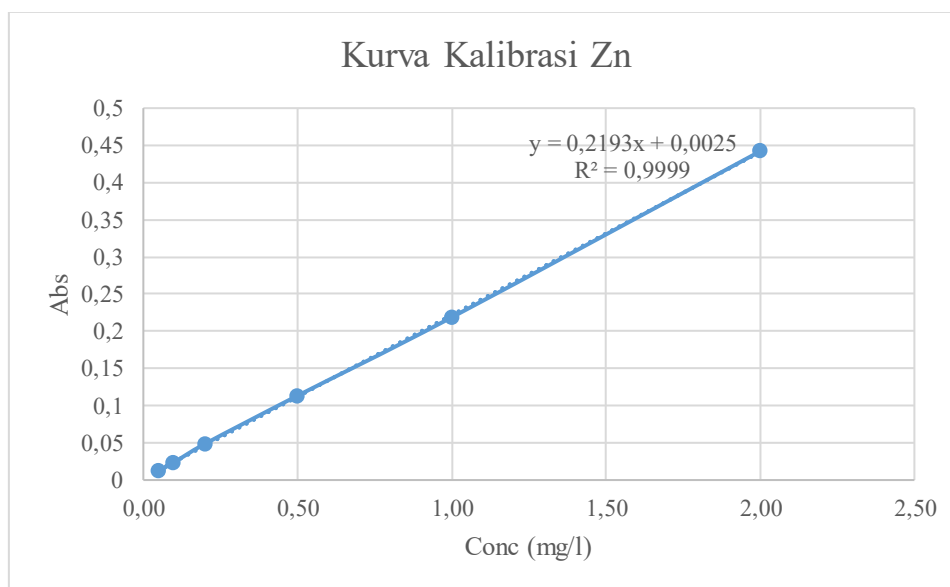
4.1.1.1 Kurva Kalibrasi Logam Berat Seng (Zn)

Kurva kalibrasi yang pertama yaitu logam berat seng (Zn), dengan menggunakan larutan standar yang memiliki konsentrasi antara 0,05 mg/l hingga 2 mg/l. Data hasil pengukuran konsentrasi larutan standar dan absorbansi dapat dilihat pada Tabel 4.1 berikut.

Tabel 4. 1 Data Larutan Standar Zn

Parameter	Cons (mg/l)	Abs
Zn	0,05	0,0123
	0,1	0,0239
	0,2	0,0487
	0,5	0,1134
	1	0,2188
	2	0,4420
LoD	0,0294	

Berdasarkan hasil pengukuran, semakin tinggi konsentrasi larutan standar semakin tinggi juga nilai absorbansi. Dari data hasil pengukuran larutan standar, diperoleh slope (a) sebesar 0,2193 dan intercept (b) sebesar 0,0025 dan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9999 yang dapat dilihat pada Gambar 4.1 berikut.



Gambar 4. 1 Kurva Kalibrasi Zn

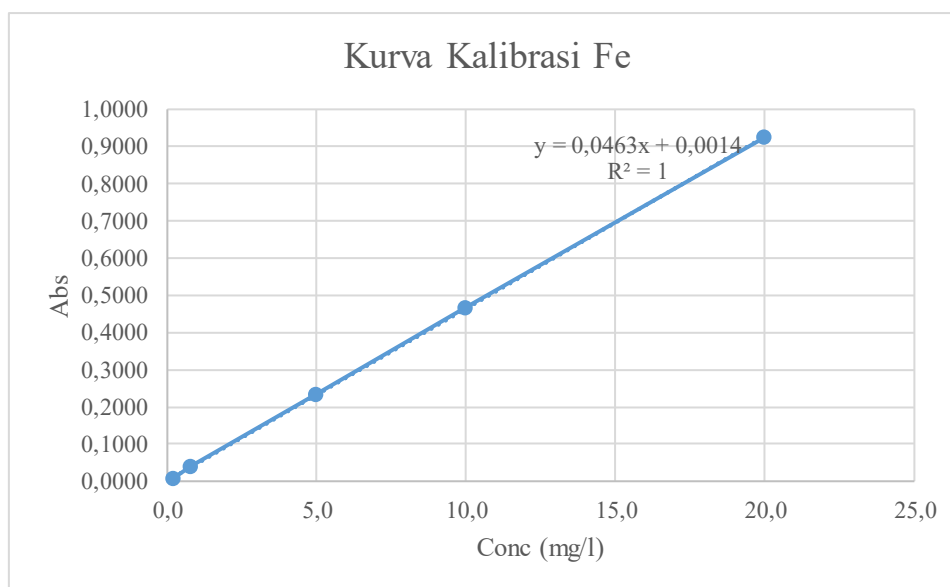
4.1.1.2 Kurva Kalibrasi Logam Berat Besi (Fe)

Kurva kalibrasi yang kedua yaitu logam berat besi (Fe), dengan menggunakan larutan standar yang memiliki konsentrasi antara 0,2 mg/l hingga 20 mg/l. Data hasil pengukuran konsentrasi larutan standar dan absorbansi dapat dilihat pada Tabel 4.2 berikut.

Tabel 4. 2 Data Larutan Standar Fe

Parameter	Cons (mg/l)	Abs
Fe	0,2	0,0080
	0,8	0,0390
	05	0,2330
	10	0,4680
	20	0,9250
LoD	0,1903	

Berdasarkan hasil pengukuran, semakin tinggi konsentrasi larutan standar semakin tinggi juga nilai absorbansi. Dari data hasil pengukuran larutan standar, diperoleh slope (a) sebesar 0,0463 dan intercept (b) sebesar 0,0014 dan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 1 yang dapat dilihat pada Gambar 4.2 berikut.



Gambar 4. 2 Kurva Kalibrasi Fe

4.1.1.3 Kurva Kalibrasi Logam Berat Kromium (Cr)

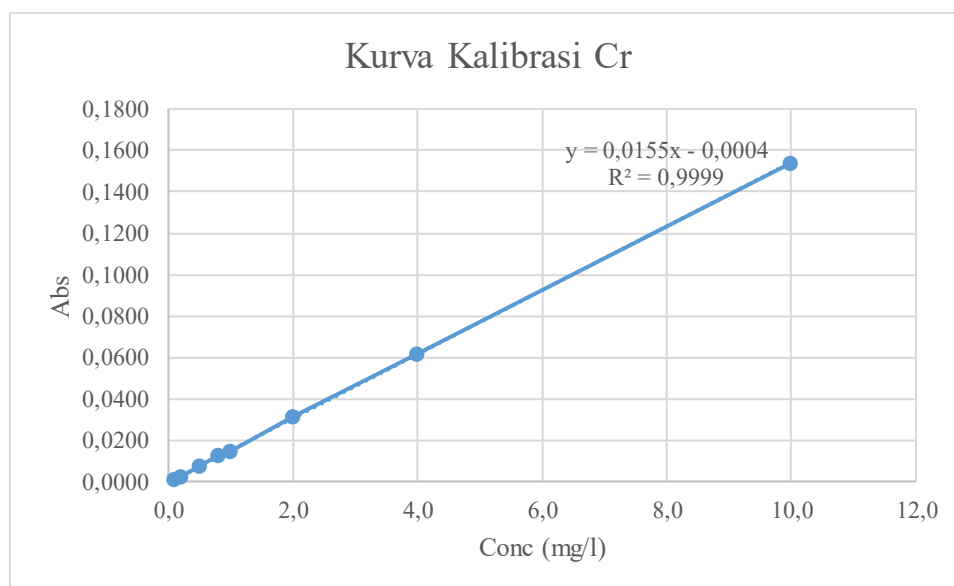
Kurva kalibrasi yang ketiga yaitu logam berat kromium (Cr), dengan menggunakan larutan standar yang memiliki konsentrasi antara 0,1 mg/l hingga 10 mg/l. Data hasil pengukuran konsentrasi larutan standar dan absorbansi dapat dilihat pada Tabel 4.3 berikut.

Tabel 4. 3 Data Larutan Standar Cr

Parameter	Cons (mg/l)	Abs
Cr	0,1	0,0010
	0,2	0,0022
	0,5	0,0073
	0,8	0,0124
	1	0,0144

Parameter	Cons (mg/l)	Abs
	2	0,0311
	4	0,0620
	10	0,1540
LoD	0,0991	

Berdasarkan hasil pengukuran, semakin tinggi konsentrasi larutan standar semakin tinggi juga nilai absorbansi. Dari data hasil pengukuran larutan standar, diperoleh slope (a) sebesar 0,0155 dan intercept (b) sebesar 0,0004 dan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9999 yang dapat dilihat pada Gambar 4.3 berikut.



Gambar 4. 3 Kurva Kalibrasi Cr

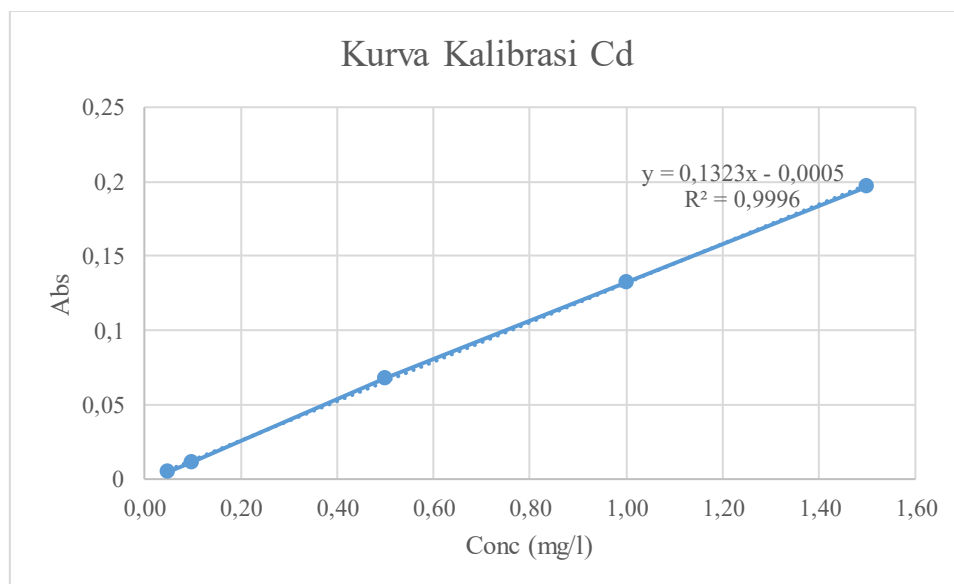
4.1.1.4 Kurva Kalibrasi Logam Berat Kadmium (Cd)

Kurva kalibrasi yang keempat yaitu logam berat kadmium (Cd), dengan menggunakan larutan standar yang memiliki konsentrasi antara 0,05 mg/l hingga 1,5 mg/l. Data hasil pengukuran konsentrasi larutan standar dan absorbansi dapat dilihat pada Tabel 4.4 berikut.

Tabel 4. 4 Data Larutan Standar Cd

Parameter	Cons (mg/l)	Abs
Cd	0,05	0,0049
	0,1	0,0118
	0,5	0,0682
	1	0,1328
	1,5	0,1965
LoD	0,0452	

Berdasarkan hasil pengukuran, semakin tinggi konsentrasi larutan standar semakin tinggi juga nilai absorbansi. Dari data hasil pengukuran larutan standar, diperoleh slope (a) sebesar 0,1323 dan intercept (b) sebesar 0,0005 dan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9996 yang dapat dilihat pada Gambar 4.4 berikut.



Gambar 4. 4 Kurva Kalibrasi Cd

4.1.1.5 Kurva Kalibrasi Logam Berat Timbal (Pb)

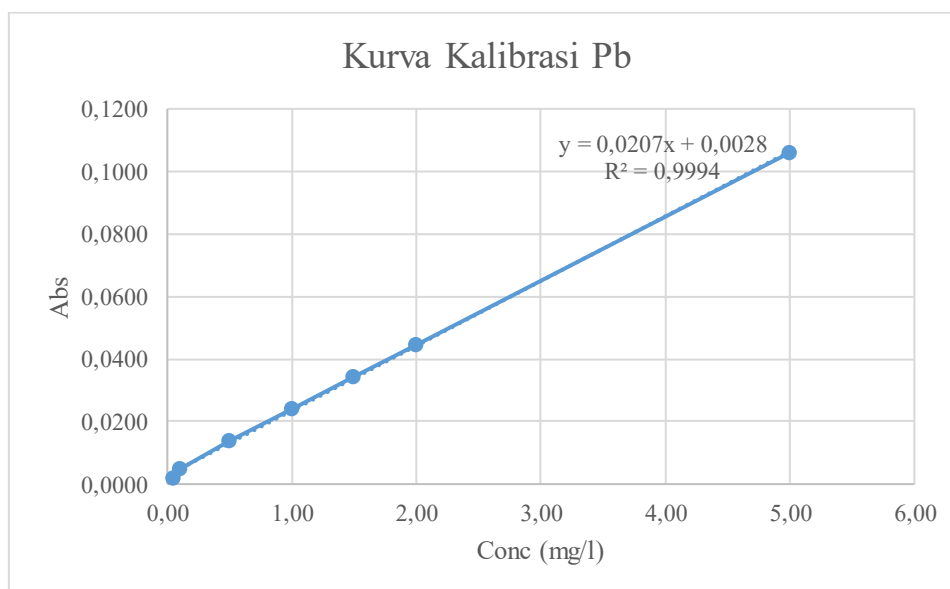
Kurva kalibrasi yang kelima yaitu logam berat timbal (Pb), dengan menggunakan larutan standar yang memiliki konsentrasi antara 0,05 mg/l hingga

5 mg/l. Data hasil pengukuran konsentrasi larutan standar dan absorbansi dapat dilihat pada Tabel 4.5 berikut.

Tabel 4. 5 Data Larutan Standar Pb

Parameter	Cons (mg/l)	Abs
Pb	0,05	0,0020
	0,1	0,0020
	0,5	0,0049
	1	0,0342
	2	0,0444
	5	0,1060
LoD	0,1421	

Berdasarkan hasil pengukuran, semakin tinggi konsentrasi larutan standar semakin tinggi juga nilai absorbansi. Dari data hasil pengukuran larutan standar, diperoleh slope (a) sebesar 0,0207 dan intercept (b) sebesar 0,0028 dan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9994 yang dapat dilihat pada Gambar 4.5 berikut.



Gambar 4. 5 Kurva Kalibrasi Pb

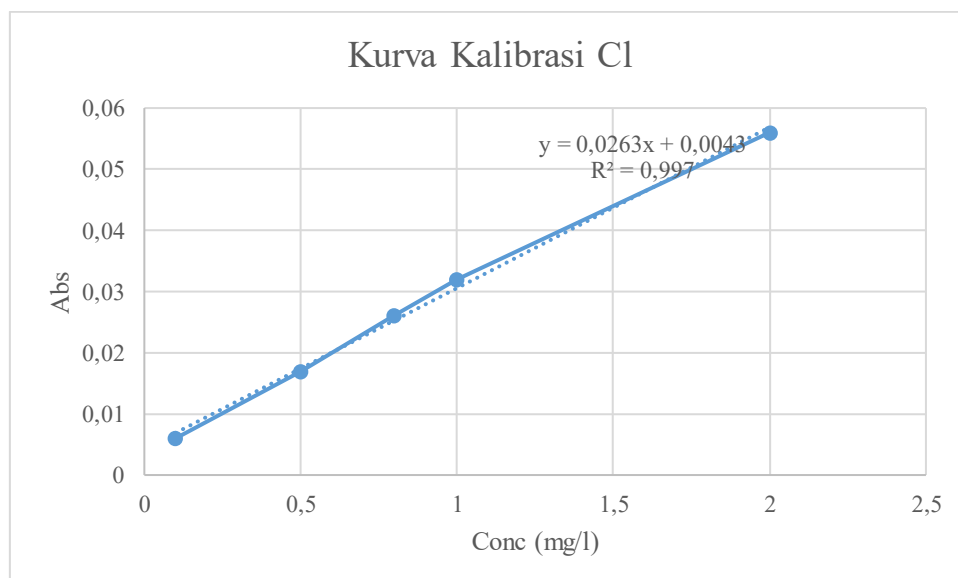
4.1.1.6 Kurva Kalibrasi Klorin (Cl)

Kurva kalibrasi yang terakhir yaitu parameter klorin (Cl), dengan menggunakan larutan standar yang memiliki konsentrasi antara 0,1 mg/l hingga 2 mg/l. Data hasil pengukuran konsentrasi larutan standar dan absorbansi dapat dilihat pada Tabel 4.6 berikut.

Tabel 4. 6 Data Larutan Standar Cl

Parameter	Cons (mg/l)	Abs
Cl	0,1	0,006
	0,5	0,017
	0,8	0,026
	1	0,032
	2	0,056

Berdasarkan hasil pengukuran, semakin tinggi konsentrasi larutan standar semakin tinggi juga nilai absorbansi. Dari data hasil pengukuran larutan standar, diperoleh slope (a) sebesar 0,0263 dan intercept (b) sebesar 0,0043 dan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,997 yang dapat dilihat pada Gambar 4.6 berikut.



Gambar 4. 6 Kurva Kalibrasi Cl

4.1.2 Hasil Pembacaan dengan AAS

Setelah mendapatkan kurva kalibrasi untuk setiap parameter logam berat, yaitu parameter seng (Zn), besi (Fe), kromium (Cr), kadmium (Cd), dan timbal (Pb), serta parameter klorin (Cl), selanjutnya dilakukan pengukuran absorbansi untuk sampel RDF Baru (*Fresh* RDF), RDF Tersimpan dan *Bottom Ash* dengan instrumen AAS. Nilai absorbansi yang diukur merupakan reaksi instrumen AAS terhadap konsentrasi logam berat yang terdapat dalam larutan hasil destruksi. Hasil pengukuran absorbansi untuk masing – masing sampel dapat dilihat pada Tabel 4.7 berikut.

Tabel 4. 7 Hasil Pengukuran Absorbansi Sampel

Parameter	Bottom Ash	RDF Baru (<i>Fresh</i> RDF)	RDF Tersimpan
Zn	0,39705	0,1999	0,2040
Fe	0,6362	0,6757	0,6311
Cr	0,0681	0,0113	0,0359
Cd	0,0907	0,0019	0,0029
Pb	0,0369	0,0079	0,0130

Data hasil pengukuran konsentrasi logam berat pada larutan hasil destruksi dapat dilihat pada Tabel 4.8 berikut.

Tabel 4. 8 Hasil Pengukuran Konsentrasi (mg/L) Logam Berat

Parameter	Bottom Ash	RDF Basah	RDF Kering
Zn	1,7995	0,9003	0,9190
Fe	13,72	14,57	13,61
Cr	4,4289	0,7575	2,3476
Cd	0,6894	0,0181	0,0256
Pb	1,5337	0,1321	0,3782

Hasil pengukuran absorbansi dan konsentrasi untuk parameter klorin (Cl) pada masing – masing sampel dapat dilihat pada Tabel 4.9 berikut.

Tabel 4. 9 Hasil Pengukuran Absorbansi dan Conc (mg/L)Sampel

Parameter Cl	Bottom Ash	RDF Baru (<i>Fresh RDF</i>)	RDF Tersimpan
Abs	0,007	0,02	0,025
Conc (mg/L)	0,1044	0,5987	0,7888

Data hasil pengukuran konsentrasi logam berat pada larutan hasil destruksi dalam mg/kg dapat dilihat pada Tabel 4.10 berikut.

Tabel 4. 10 Hasil Pengukuran kadar (mg/kg) Logam Berat

Parameter	Bottom Ash	RDF Baru (<i>Fresh RDF</i>)	RDF Tersimpan
Zn	879,94	457,10	425,68
Fe	1692,85	1686,27	1424,15
Cr	108,25	81,08	251,27
Cd	17,38	2,97	2,70
Pb	77,11	18,39	44,19

Hasil pengukuran absorbansi dan konsentrasi untuk parameter klorin (Cl) dalam mg/kg pada masing – masing sampel dapat dilihat pada Tabel 4.11

Tabel 4. 11 Hasil Pengukuran kadar klorin

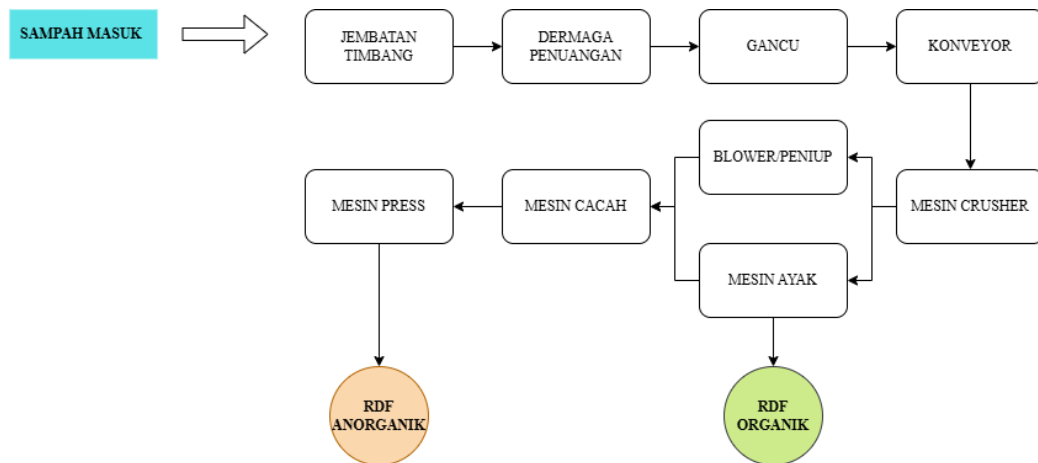
Parameter Cl	Bottom Ash	RDF Baru (<i>Fresh RDF</i>)	RDF Tersimpan
Kadar (mg/kg)	5,20	29,91	39,42

4.2 Pembahasan

4.2.1 Pengolahan Sampah di TPST Sendangsari

Alur pengolahan sampah di TPST Sendangsari terdiri atas beberapa tahapan. Proses diawali dengan penerimaan sampah yang berasal dari kegiatan pengumpulan sampah rumah tangga dan fasilitas umum di wilayah layanan. Sampah yang

diterima kemudian melalui tahap penimbangan dan pembongkaran sebelum dilakukan pemilahan awal. Pada tahap pemilahan awal, sampah dipisahkan menjadi sampah organik dan anorganik. Alur pengolahan sampah di TPST Sendangsari dapat dilihat pada Gambar 4.7 berikut.



Gambar 4. 7 Diagram Alir Pengolahan Sampah TPST Sendangsari

1) Sampah Masuk dan Jembatan Timbang

Sampah yang masuk ke TPST Sendangsari diangkut menggunakan truk, terlebih dahulu melewati jembatan timbang untuk mengetahui dan pencatatan berat sampah yang masuk sebelum pengolahan.



Gambar 4.8 Sampah masuk dan Jembatan Timbang

2) Dermaga Penuangan dan Gancu

Setelah melalui penimbangan dan pencatatan, sampah kemudian dituang di area dermaga penuangan sebelum melewati proses berikutnya. Dari dermaga penuangan sampah akan diarahkan masuk ke konveyor melalui gancu yang dilakukan secara manual oleh pekerja TPST.



Gambar 4.9 Dermaga Penuangan dan Gancu

3) Konveyor dan Mesin *Crusher*

Sampah yang masuk ke konveyor akan dilakukan pemilahan secara manual oleh pekerja, dalam satu konveyor terdiri dari 3 pekerja. Sampah dipilah berdasarkan jenis yang masih memiliki nilai guna (botol plastik, kaleng minuman), sampah yang berpotensi merusak mesin (tali, kayu/ranting) dan sampah jenis B3 (baterai bekas, kabel, lampu bekas). Setelah dipilah, sampah akan melalui mesin *crusher* untuk memperkecil ukuran sampah.



Gambar 4.10 Mesin Konveyor dan Mesin *Crusher*

4) Mesin Ayak dan Blower/Peniup

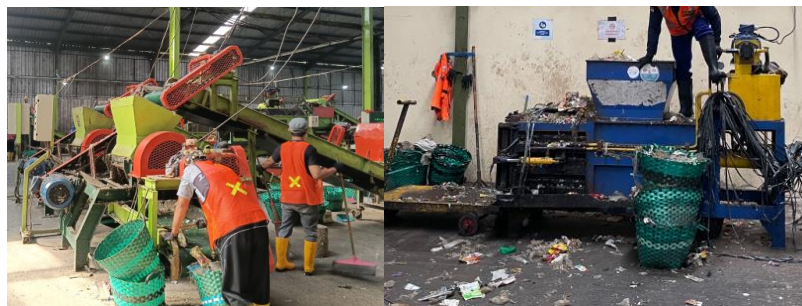
Setelah ukuran sampah lebih kecil, sampah melalui mesin ayak dimana sampah organik akan jatuh ke bawah dan ditampung oleh petugas untuk menjadi bahan RDF Organik. Sedangkan sampah yang ringan seperti plastik, akan tertiu di mesin blower atau peniup yang kemudian akan menjadi bahan RDF Anorganik.



Gambar 4.11 Mesin Ayak dan Blower/Peniup

5) Mesin Cacah dan Mesin Press

Sampah plastik yang tertiuap sebelumnya, kemudian akan melewati mesin cacah untuk menjadi ukuran yang lebih kecil dan seragam. Sampah yang sudah dicacah ini kemudian ditampung oleh pekerja untuk selanjutnya di press di mesin press RDF. Output dari cacahan sampah plastik ini yaitu bahan bakar RDF yang akan di kirim ke PT. SBI Cilacap.



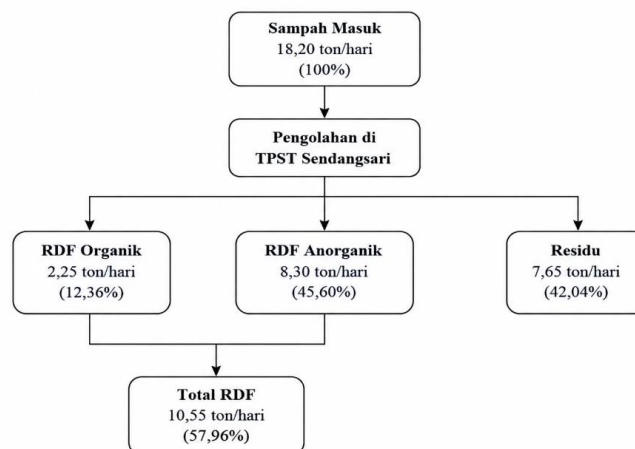
Gambar 4. 12 Mesin Cacah dan Mesin Press

TPST Sendangsari juga melakukan pemisahan terhadap sampah anorganik yang memiliki nilai jual, seperti botol plastik, karton, kotak susu bekas, botol kaca, kaleng, dan material sejenis lainnya. Pemilahan awal juga bertujuan untuk memisahkan sampah yang berpotensi mengganggu atau merusak peralatan pengolahan, seperti kabel bekas, tali rafia, kain, serta jenis sampah lainnya yang dapat menyebabkan kerusakan pada alat. Semetara itu, sampah anorganik yang tidak memiliki nilai jual diproses lebih lanjut untuk diolah menjadi produk *Refuse Derived Fuel* (RDF) yang selanjutnya akan digunakan sebagai bahan bakar pada industri semen. Komposisi sampah yang masuk ke TPST Sendangsari dapat dilihat pada Tabel 4.12 berikut.

Tabel 4. 12 Komposisi sampah di TPST Sendangsari

TPST Sendangsari		
Komposisi	Organik	sampah kebun (kayu dan ranting), sampah dapur, sisa makanan
	Anorganik	Sampah plastik, kertas/karton, logam/kaca, botol
	B3	baterai bekas, kabel, kawat, lampu bekas

Sampah masuk di TPST Sendangsari mencapai rata – rata 18,2 ton/hari. Pengolahan sampah di TPST Sendangsari menghasilkan RDF sekitar 8,3 ton/hari dan sampah organik sekitar 2,25 ton/hari. Diagram neraca massa pengolahan sampah di TPST Sendangsari dapat dilihat pada Gambar 4.13 berikut.



Gambar 4. 13 Neraca Massa Pengolahan Sampah TPST Sendangsari

4.2.2 Analisis Kandungan Logam Berat

Analisis kandungan logam berat pada *Refuse Derived Fuel* (RDF) dan *Bottom Ash* dengan metode *Atomic Absorption Spectrophotometry* (AAS) dimulai dengan pembuatan kurva kalibrasi pada setiap parameter logam berat, yang meliputi parameter seng (Zn), besi (Fe), kromium (Cr), kadmium (Cd), dan timbal (Pb). Berdasarkan hasil kurva kalibrasi sebelumnya, menunjukkan adanya hubungan linier konsentrasi larutan standar dan tingkat penyerapan masing –

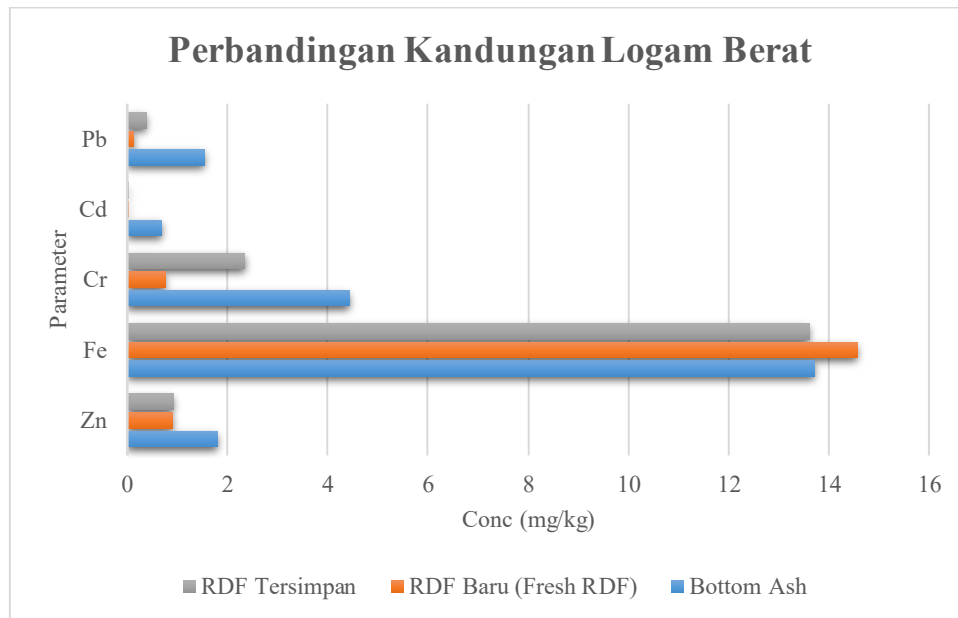
masing parameter uji yang terukur. Berdasarkan kurva kalibrasi, nilai koefisien determinasi (R^2) mendekati atau sama dengan 1, yaitu terdapat respon penyerapan konsentrasi logam dan efektif untuk menentukan konsentrasi logam berat dalam sampel uji secara tepat dan akurat.

Nilai LoD atau *Limit of Detection* merupakan nilai batas deteksi yang diperoleh untuk menunjukkan kapasitas instrumen dalam mendeteksi konsentrasi logam berat atau konsentrasi terkecil yang masih dapat terdeteksi oleh instrumen AAS. Pada hasil pengukuran konsentrasi sebelumnya, parameter Cd pada sampel RDF Baru (*Fresh RDF*) dan RDF Tersimpan memiliki konsentrasi dibawah LoD. Nilai LoD = 0,0452 sedangkan konsentrasi RDF Baru (*Fresh RDF*) = 0,0181 mg/L dan RDF Tersimpan = 0,0256 mg/L. Hal ini menunjukkan pada kedua sampel tersebut memiliki kadar parameter Cd yang sangat rendah. Maka dapat dituliskan konsentrasi Cd < 0,045, seperti pada Tabel 4.13 berikut.

Tabel 4. 13 Hasil Pengukuran Konsentrasi (mg/L) Logam Berat

Parameter	Bottom Ash	RDF Baru (<i>Fresh RDF</i>)	RDF Tersimpan
Zn	1,7995	0,9003	0,9190
Fe	13,72	14,57	13,61
Cr	4,4289	0,7575	2,3476
Cd	0,6894	< 0,0452	< 0,0452
Pb	1,5337	0,1321	0,3782

Perbandingan kelima kandungan logam berat pada sampel RDF Baru (*Fresh RDF*), RDF Tersimpan dan *bottom ash* dapat dilihat melalui diagram batang pada Gambar 4.14 berikut.



Gambar 4. 14 Diagram Perbandingan Kandungan Logam Berat

Berdasarkan diagram dapat kita lihat bahwa kandungan logam berat paling tinggi yaitu logam berat besi (Fe) dan kromium (Cr). Logam berat besi (Fe) memiliki konsentrasi tertinggi pada sampel RDF Baru (*Fresh RDF*), RDF Tersimpan, dan *bottom ash* dibandingkan parameter lainnya. Sedangkan logam berat kromium (Cr) paling tinggi terdapat pada sampel *bottom ash* dibandingkan sampel lainnya. Konsentrasi logam berat terendah terdapat pada sampel RDF Baru (*Fresh RDF*) dan RDF Tersimpan, yaitu logam berat timbal (Pb) dan kadmium (Cd). Tingginya konsentrasi logam berat terutama pada parameter besi (Fe) yang paling dominan di TPST Sendangsari, dipengaruhi oleh variasi sampah seperti besi dan kawat yang banyak terdapat di RDF dan terutama pada *bottom ash* yang bercampur dengan kawat dan material berbahan besi yang sudah berkarat.

4.2.3 Analisis Kandungan Klorin (Cl)

Analisis kandungan klorin pada *Refuse Derived Fuel* (RDF) dan *Bottom Ash* dengan metode Spektrofotometri UV-Vis dimulai dengan pembuatan kurva kalibrasi pada hasil pembacaan absorbansi larutan standar. Berdasarkan hasil kurva kalibrasi sebelumnya, menunjukkan adanya hubungan linier konsentrasi larutan

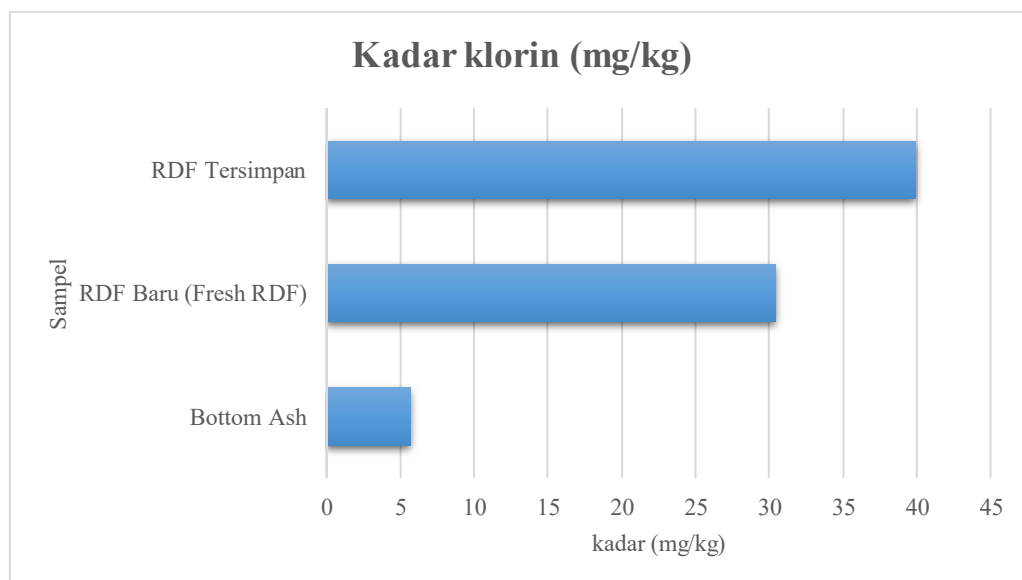
standar dan tingkat penyerapan masing – masing parameter uji yang terukur. Berdasarkan kurva kalibrasi, nilai koefisien determinasi (R^2) mendekati atau sama dengan 1, yaitu terdapat respon penyerapan konsentrasi klorin dan efektif untuk menentukan kadar klorin dalam sampel uji secara tepat dan akurat.

Sebelum pembacaan kadar klorin, sampel ditambahkan indikator klorin klorin atau *DPD bebas chlorine reagen* yang berfungsi untuk mengukur kadar klorin bebas dalam sampel. Hasil pengukuran absorbansi dan konsentrasi untuk parameter klorin (Cl) dalam mg/kg pada masing – masing sampel dapat dilihat pada Tabel 4.14 berikut.

Tabel 4. 14 Hasil Pengukuran kadar klorin

Parameter Cl	Bottom Ash	RDF Baru (<i>Fresh RDF</i>)	RDF Tersimpan
Kadar (mg/kg)	5,20	29,91	39,42

Kemudian, berdasarkan hasil pengukuran dapat diperoleh perbandingan kandungan klorin pada sampel RDF Baru (*Fresh RDF*), RDF Tersimpan dan *bottom ash* yang dapat dilihat melalui diagram batang pada Gambar 4.15 berikut.



Gambar 4. 15 Diagram Perbandingan Kandungan Klorin

Berdasarkan diagram dapat kita lihat bahwa klorin paling tinggi terdapat pada sampel RDF Tersimpan. Kandungan klorin dalam RDF berasal dari variasi sampah yang mengandung senyawa klor seperti *polyvinyl chloride* (PVC), bahan tekstil sintesis, serta beberapa bahan yang mengandung klorin. Kadar klorin pada RDF Baru (*Fresh RDF*) lebih rendah dibanding RDF Tersimpan, hal ini menunjukkan kadar air dan proses pengeringan pada RDF berpengaruh terhadap kandungan klorin didalamnya. Proses pengeringan menyebabkan massa material berkurang sehingga kandungan klorin didalamnya juga mengalami peningkatan.

Kadar klorin pada sampel *bottom ash* paling rendah dibandingkan dengan RDF Baru (*Fresh RDF*) maupun RDF Tersimpan. Hal ini menunjukkan proses pembakaran berpengaruh terhadap kandungan klorin yang terdapat dalam sampel. Pada saat proses pembakaran, senyawa klorin terlepas dalam fase gas (hidrogen klorida/ HCl) yang menyebabkan hanya sedikit yang tertinggal pada residu *bottom ash*.

4.2.4 Perbedaan Karakteristik RDF dan *Bottom Ash*

Berdasarkan hasil penelitian, terdapat perbedaan signifikan pada kandungan logam berat dan kandungan klorin dalam RDF dan *Bottom Ash*. Perbedaan hasil ini dipengaruhi oleh perbedaan karakteristik atau variasi komposisi sampah yang dihasilkan di TPST Sendangsari. Sampah dominan yang dihasilkan di TPST Sendangsari berupa sampah mudah terbakar seperti plastik, kardus, dan kertas, serta sampah organik seperti sisa makanan dan sampah dapur.

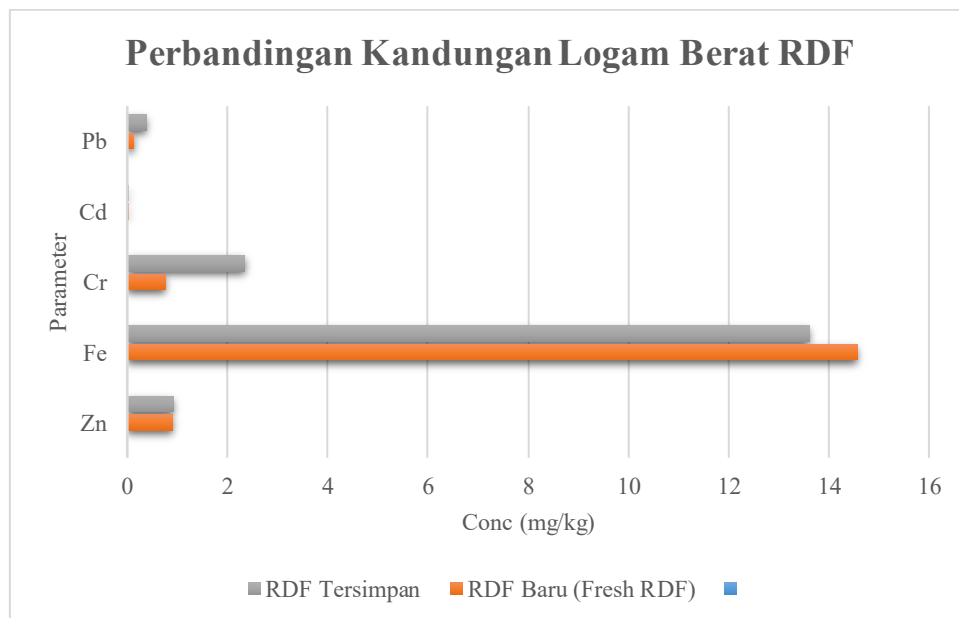
Tinggi rendahnya konsentrasi logam berat dalam sampel RDF dan *Bottom Ash* dapat dipengaruhi oleh faktor variasi komposisi sampah yang masuk. Kandungan logam berat dan variasi komposisi sumber sampah dapat dilihat pada Tabel 4.15 berikut (Skutan & Brunner, 2012).

Tabel 4. 15 Kandungan Logam Berat dan Sumber

Parameter	Sumber
Zn	Plastik, karet, serta material berlapis seng

Parameter	Sumber
Fe	Kaleng, besi, kawat, material mengandung berlapis besi
Cr	Stainless steel, pigmen warna, material logam tertentu
Cd, Pb	Baterai bekas, kabel, lampu bekas, komponen elektronik

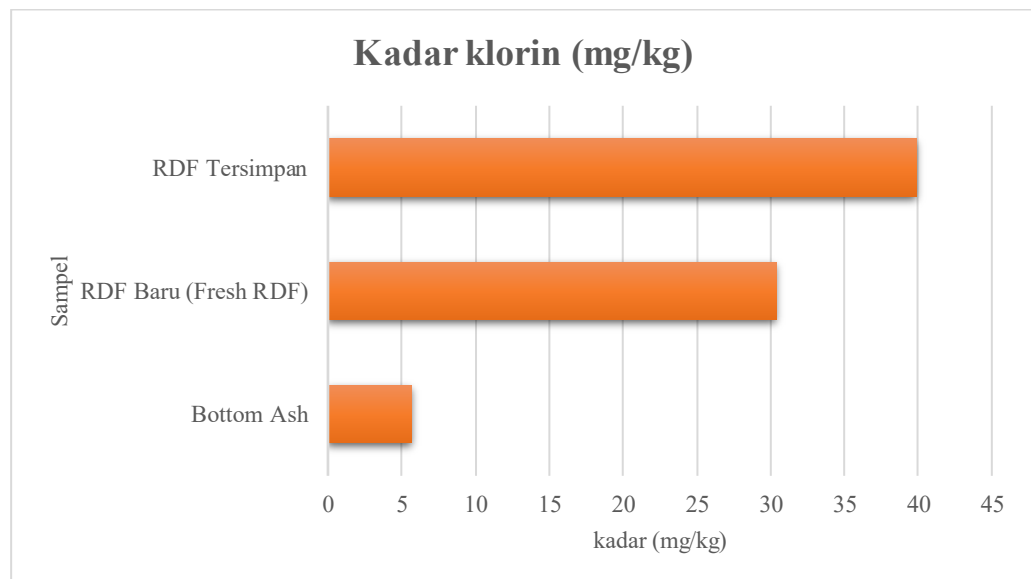
Berdasarkan hasil penelitian, RDF Baru (*Fresh* RDF) dan RDF Tersimpan menunjukkan hasil yang cukup berbeda meskipun variasi komposisi sampah didalamnya sama, dapat dilihat pada Gambar 4.16. Kandungan Fe lebih tinggi pada RDF Baru (*Fresh* RDF) namun kandungan Cr lebih tinggi pada RDF Tersimpan. Hal ini menunjukkan, proses pengeringan berpengaruh terhadap kandungan unsur-unsur yang terdapat dalam RDF Baru (*Fresh* RDF). Namun, beberapa parameter seperti kromium (Cr) mengalami peningkatan pada RDF Tersimpan, menunjukkan bahwa proses pengeringan yang menyebabkan kadar air menurun pada RDF dapat menyebabkan peningkatan konsentrasi logam berat di dalamnya.



Gambar 4. 16 Diagram Perbandingan Kandungan Logam Berat pada RDF Baru (*Fresh* RDF) dan RDF Tersimpan

Berdasarkan hasil pengujian terdeteksi kandungan logam berat yang cukup tinggi. Di TPST Sendangsari belum ada pengelolaan abu dasar yang dihasilkan, dimana hanya diletakkan pada ruang terbuka tanpa wadah. Hal ini dapat mencemari tanah apabila terkena air hujan dan mengalir ke lingkungan.

Hasil pengujian kandungan klorin cukup berbeda antara RDF dan *Bottom Ash*, dimana kandungan klorin paling tinggi dihasilkan pada RDF Tersimpan sebesar 39,42 mg/kg dan kandungan klorin terendah pada Bottom Ash sebesar 5,2 mg/kg. Perbedaan nilai yang cukup tinggi ini menunjukkan bahwa proses pembakaran di TPST Sendangsari dengan memanfaatkan teknologi *rotary drying* yang menghasilkan residu berupa abu berpengaruh terhadap kandungan klorin di dalam RDF. Pada proses pembakaran yang terjadi sebagian besar senyawa klorin yang ada berubah ke dalam fase gas dan terlepas ke udara, sehingga kandungan klorin yang tertinggal pada residu abu relatif lebih kecil. Perbedaan kadar klorin pada RDF dan *Bottom Ash* dapat dilihat pada Gambar 4.17 berikut.



Gambar 4. 17 Diagram Perbandingan Kandungan Klorin (Cl) pada RDF dan *Bottom Ash*

Proses pembakaran yang terjadi menyebabkan sebagian besar senyawa klorin yang ada berubah ke dalam fase gas dalam bentuk hidrogen klorida (HCl) dan terlepas ke udara. Jika klorin yang terlepas dalam bentuk HCl dalam jumlah besar akan

berpotensi menyumbang emisi ke lingkungan. Untuk itu perlu dilakukan pengujian lebih lanjut untuk mengetahui emisi yang terlepas ke lingkungan.

4.2.5 Perbandingan Baku Mutu

TPST Sendangsari ini mengolah sampah menjadi RDF, yang kemudian bekerjasama dengan perusahaan semen PT. SBI di Cilacap untuk digunakan sebagai bahan bakar alternatif mereka. Berdasarkan Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 22 Tahun 2021 yang mengatur tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, kandungan logam berat yang telah di uji sebelumnya termasuk pada parameter bahan berbahaya dan beracun yang berpotensi menimbulkan bahaya. Peraturan tersebut dapat digunakan sebagai acuan dalam memastikan kandungan bahan berbahaya tidak melebihi ambang batas yang telah ditentukan. Namun pada penelitian ini tidak melakukan uji TCLP tetapi menggunakan metode AAS, oleh karena itu hasil yang diperoleh hanya menunjukkan adanya kandungan logam berat dan klorin dalam sampel. Untuk dapat membandingkan dan memastikan dengan baku mutu TCLP yang ada pada Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 22 Tahun 2021, diperlukan pengujian TCLP sebagai analisis lebih lanjut untuk menentukan keamanan RDF yang dihasilkan.

Selain itu, kualitas RDF untuk penggunaan sebagai bahan bakar alternatif pada industri semen diatur dalam standar *European Norm* atau EN 15359 : 2011. Standar ini merupakan standar Eropa yang diterbitkan oleh *European Committee for Standardization* (CEN) mengenai kualitas *Solid Recovered Fuel* (SRF) berdasarkan nilai kalor, kandungan klorin dan kandungan merkuri. Standar ini telah banyak digunakan sebagai acuan dalam pemanfaatan SRF atau RDF sebagai bahan bakar alternatif pada industri semen. Tabel klasifikasi SRF sesuai dengan standar EN 15359 : 2011 dapat dilihat pada Tabel 4.16 berikut.

Tabel 4. 16 Klasifikasi SRF berdasarkan standar EN 15359 : 2011

Karakteristik	Satuan	Kelas				
		1	2	3	4	5
Nilai kalor bebas (NCV)	MJ/kg	≥ 25	≥ 20	≥ 15	≥ 10	≥ 3

Kandungan klorin (Cl)	%	≤ 0,2	≤ 0,6	≤ 1,0	≤ 1,5	≤ 3
Kandungan merkuri (Hg)	Mg/MJ	≤ 0,02	≤ 0,03	≤ 0,08	≤ 0,15	≤ 0,50

Perbandingan hasil uji kualitas atau klasifikasi RDF di TPST Sendangsari dengan standar EN 15359 : 2011 dapat dilihat pada Tabel 4.17 berikut.

Tabel 4. 17 Perbandingan hasil uji dengan standar EN 15359 : 2011

Sampel	Hasil uji (mg/kg)	Hasil uji (%)	Klasifikasi standar EN 15359
RDF Baru (<i>Fresh</i> RDF)	30,39	0,00304	Kelas 1
RDF Tersimpan	39,90	0,00399	Kelas 1

TPST Sendangsari melakukan kerjasama dengan PT. Solusi Bangun Indonesia (SBI) Cilacap untuk pemanfaatan RDF yang dihasilkan. Berdasarkan tabel dapat kita ketahui bahwa kualitas RDF yang dihasilkan di TPST Sendangsari masuk klasifikasi kelas 1, yang menunjukkan RDF yang dihasilkan memiliki kualitas baik untuk digunakan sebagai bahan bakar alternatif.

Kualitas residu hasil pembakaran berupa *Bottom Ash* yang dihasilkan mengacu pada Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan (Permen LHK) Nomor 26 Tahun 2020 tentang Penanganan Abu Dasar dan Abu Terbang Hasil Pengolahan Sampah Secara Termal. Perbandingan hasil uji dengan baku mutu dapat dilihat pada Tabel 4.18 berikut.

Tabel 4. 18 Hasil Pengukuran kadar (mg/kg) Logam Berat

Parameter	Bottom Ash (mg/kg)	Bottom Ash (mg/L)	Baku Mutu (mg/L)
Zn	879,94	1,7995	-
Fe	1692,85	13,72	50
Cr	108,25	4,4289	2,5
Cd	17,38	0,6894	0,15
Pb	77,11	1,5337	0,5

Cl	5,20	0,1044	125
----	------	--------	-----

Berdasarkan perbandingan hasil uji dengan baku mutu yang berlaku, parameter Kromium (Cr), Kadmium (Cd) dan Timbal (Pb) melebihi baku mutu. Tingginya konsentrasi ketiga parameter logam berat tersebut dapat disebabkan oleh komposisi sampah yang dibakar. Beberapa sampah seperti baterai bekas maupun kabel yang lolos saat pemilahan dan ikut terbakar dapat menyebabkan kandungan Kromium (Cr), Kadmium (Cd) dan Timbal (Pb) pada residu abu yang dihasilkan menjadi tinggi.

4.2.6 Rekomendasi

Berdasarkan hasil analisis dan pengujian laboratorium pada sampel *Refuse Derived Fuel* (RDF) dan *bottom ash* yang dihasilkan oleh TPST Sendangsari. ketiga sampel uji mengandung klorin (Cl) dan juga logam berat. Kandungan logam berat dengan parameter tertinggi yaitu besi (Fe) baik pada sampel RDF Baru (*Fresh* RDF), RDF Tersimpan dan sampel *Bottom Ash*. Tingginya kadar besi (Fe) ini dipengaruhi oleh variasi komposisi sampah yang lolos proses pengolahan. Oleh karena itu, pada pemilahan awal atau konveyor perlu ditingkatkan agar tidak ada sampah mengandung atau berbahan besi (Fe) yang lolos ke proses selanjutnya.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis kandungan klorin (Cl) dan kandungan logam berat pada *Refuse Derived Fuel* (RDF) dan *bottom ash* yang dihasilkan oleh TPST Sendangsari, dengan metode AAS dan Spektrofotometri UV-Vis terdapat kandungan logam berat dan klorin (Cl) yang bervariasi. Ketiga sampel uji mengandung klorin (Cl), namun kandungan klorin tertinggi terdapat pada sampel RDF Tersimpan dengan kadar 39,42 mg/kg dan terendah pada sampel *bottom ash* dengan kadar 5,20 mg/kg. Ketiga sampel uji terdapat kandungan logam berat dengan parameter tertinggi yaitu besi (Fe) dengan kadar 1692,85 mg/kg pada *bottom ash*, 1686,27 mg/kg pada RDF Baru (*Fresh RDF*), dan 1424,15 mg/kg pada RDF Tersimpan. Tingginya kadar besi (Fe) ini dipengaruhi oleh variasi komposisi sampah yang masuk proses pengolahan hingga menjadi RDF. Selain itu, proses pengeringan dan pembakaran dengan *rotary drying* berpengaruh terhadap senyawa – senyawa yang terkandung dalam RDF dan residu (*bottom ash*) yang dihasilkan. Beberapa senyawa seperti klorin berubah fase menjadi gas pada saat pembakaran, sehingga kandungan klorin yang tertinggal pada residu relatif lebih sedikit.

5.2 Saran

Untuk penelitiannya selanjutnya dapat dilakukan analisis dan kajian lebih lanjut mengenai kadar kalor pada RDF dan juga emisi yang terlepas ke udara dari proses pembakaran yang dilakukan untuk memastikan keamanan penggunaan pada industri dalam jangka panjang. Selain itu, dapat dilakukan pengujian tambahan uji TCLP untuk mengetahui seberapa besar potensi pelepasan logam berat ke lingkungan dan mengetahui kesesuaian dengan standar baku mutu yang berlaku sesuai dengan Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 22 Tahun 2021.

DAFTAR PUSTAKA

- Afifah, Nuha Amiratul, dkk. (2023). Potensi Sampah TPA Banyuroto Kabupaten Kulon Progo sebagai *Refuse-Derived Fuel* (RDF). *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*, 8(3), 147-156.
- Anggitami, A., Setyorini, D. A., Azis, M. Y., & Rahayu, R.S. (2021). Analisis Logam Cr (VI) dengan Teknik Voltammetri Lucutan Menggunakan Elektroda Pasta Karbon Termodifikasi EDTA : Studi Pendahuluan. *ALCHEMY Jurnal Pendidikan Kimia*, 17(2), 185-191.
- Batubara, R., Mardiansyah, R., & AM, A. S. (2022). Pengadaan Tong Sampah Organik Dan Anorganik Dikelurahan Indro Kecamatan Kebomas Gresik. *DedikasiMU: Journal of Community Service*, 4(1), 101-107.
- Dewi, Rany Puspita, dkk. (2025). Uji Karakteristik Pelet *Refuse-Derived Fuel* (RDF) Hasil Proses Pengolahan Sampah Menggunakan *Pelletizer*. *Jurnal Teknik Mesin*, 11(1).
- Kristyani, Epiphana. (2024). *DLH Sleman Uji Coba Operasional TPST Sendangsari*. <https://jogja.antaranews.com/berita/667527/dlh-sleman-uji-coba-operasional-tpst-sendangsari>
- Kusuma, Donny Adhi., Lituhayu, D., & Astuti, R. S. (2024). Strategi Pengelolaan Sampah di Kabupaten Sleman. *Journal of Public Policy and Management Review*, 13(4), 156-168.
- Maulidayanti, Esti Mega, dkk. (2024). Evaluasi Produksi *Refuse-Derived Fuel* (RDF) dari Sampah Perkotaan (Studi Kasus : RDF *Plant* di Kabupaten Cilacap). *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 25(2) , 179-189.
- Peraturan Pemerintah Nomor 27 Tahun 2020 Tentang : Pengelolaan Sampah Spesifik.
- Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan (PermenLHK) Republik Indonesia Nomor 19 Tahun 2017 Tentang : Baku Mutu Emisi bagi Usaha dan/atau Kegiatan Industri Semen

- Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan (PermenLHK) Republik Indonesia Nomor 26 Tahun 2020 Tentang : Penanganan Abu Dasar dan Abu Terbang Hasil Pengolahan Sampah Secara Termal.
- Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan (PermenLHK) Republik Indonesia Nomor 14 Tahun 2021 Tentang : Pengelolaan Sampah Pada Bank Sampah.
- Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 Tentang : Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup.
- Rahman, A. S. M. A., Rahman, M. A., Majumder, S., Ahmed, P., Hossain, M. A., Rahman, M. R., & Patwary, M. (2024). *Municipal Solid Waste Characteristics and Quantification as an Assessment of the Existing Waste Management System in the Cumilla City Corporation, Bangladesh*. Journal of Applied Science & Process Engineering, 11(2).
- Rania, Mutiara Fadila, dkk. (2019). Analisis Potensi *Refuse-Derived Fuel* (RDF) Dari Sampah Pada Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Di Kabupaten Tegal Sebagai Bahan Bakar Incinerator Pirolisis. Jurnal Mesin Teknologi, 13(1).
- Salaripoor, Helia., Yousefi, H., & Abdoos, M. (2025). *Life cycle environmental assessment of Refuse-Derived Fuel (RDF) as an alternative to fossil fuels in cement production: A sustainable approach for mitigating carbon emissions*. ELSEVIER, <https://doi.org/10.1016/j.jfueco.2025.100135>.
- Sarquah, K., Narra, S., Beck, G., Bassey, U., Antwi, E., Hartmann, M., Derkyi, N. S. A., Awafo, E. A., & Nelles, M. (2023). *Characterization of Municipal Solid Waste and Assessment of Its Potential for Refuse-Derived Fuel (RDF) Valorization*. Energies, 16(1), 200. <https://doi.org/10.3390/en16010200>
- Skutan S., & Brunner Paul H. (2012). Metals in RDF and other high calorific value fractions from mechanical treatment of MSW: analysis and sampling errors. Waste Management & Research : The Journal for a Sustainable Circular Economy. 30(7). doi: 10.1177/0734242X12442740.
- Standar Nasional Indonesia (SNI) 8423-2017 Tentang : Insinerator
- Standar Nasional Indonesia (SNI) 2452-2002 Tentang : Tata Cara Teknik Operasional Pengelolaan Sampah Perkotaan.

Standar Nasional Indonesia (SNI) 8910-2021 Tentang : Cara Uji Kadar Logam dalam Contoh Uji Limbah Padat, Sedimen, dan Tanah dengan Menggunakan Metode Destruksi Asam Menggunakan Spektrofotometer Serapan Atom (SSA)-Nyala atau *Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrofotometric* (ICP-OES)

Standar Nasional Indonesia (SNI) 8966-2021 Tentang : Bahan Bakar Jumpitan Padat untuk Pembangkit Listrik

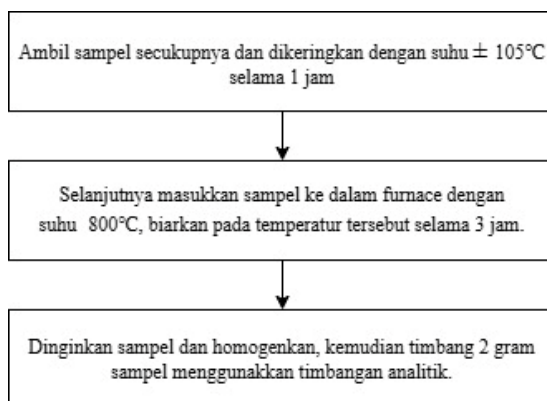
Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 18 Tahun 2008 Tentang : Pengelolaan Sampah

Zahro, Kholisatuz., Rahmasari, K. S., Nur, A. V., & Wirasti. W. (2023). Analysis of Cr and Pb in Green Mussels from the Fish Auction Site, Klidang Lor, Batang Using AAS (*Atomic Absorption Spectrofotometry*). *Indonesian Journal of Chemical Sciene*, 12(3).

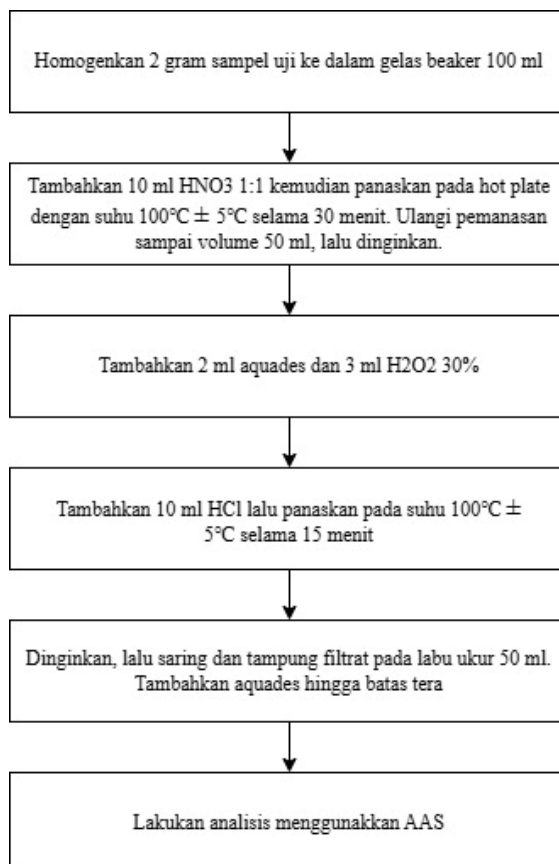
LAMPIRAN 1

LAMPIRAN 1 Langkah Pengujian Laboratorium

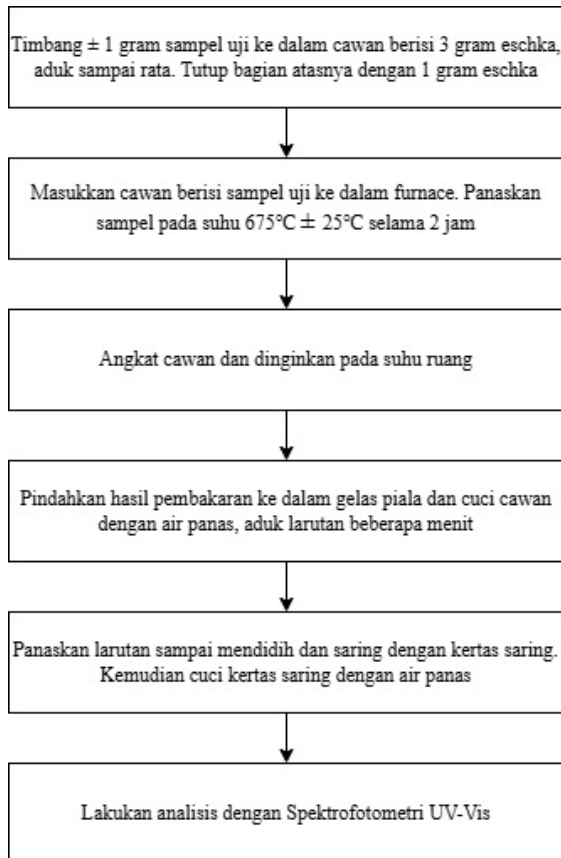
a. Pengeringan Sampel



b. Destruksi Asam (SNI 8910 : 2021)



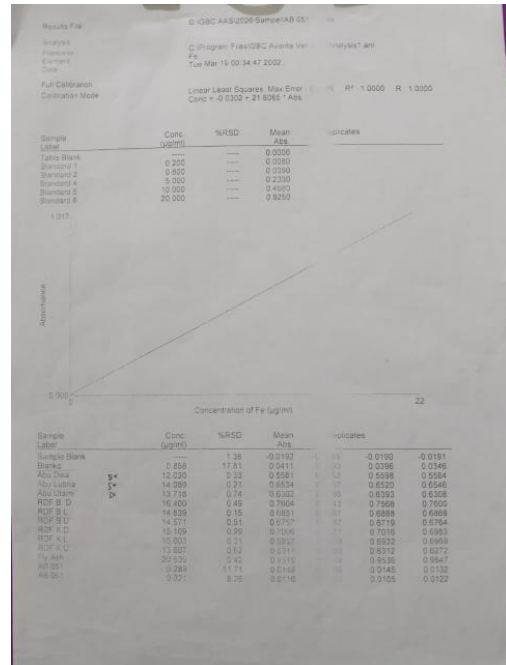
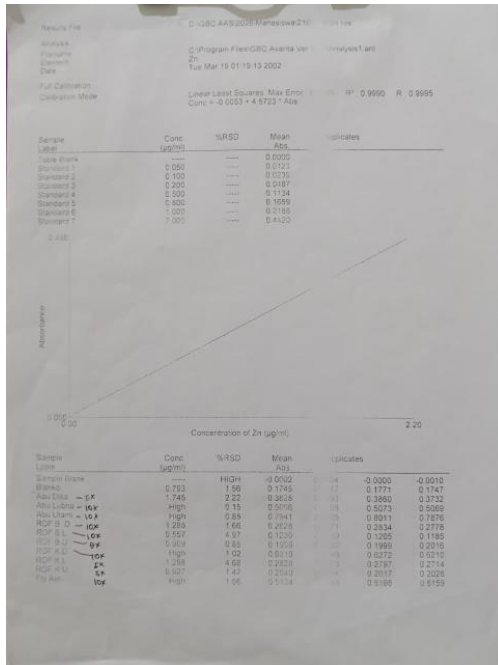
c. Kandungan Klorin (SNI 8966 : 2021)



LAMPIRAN 2

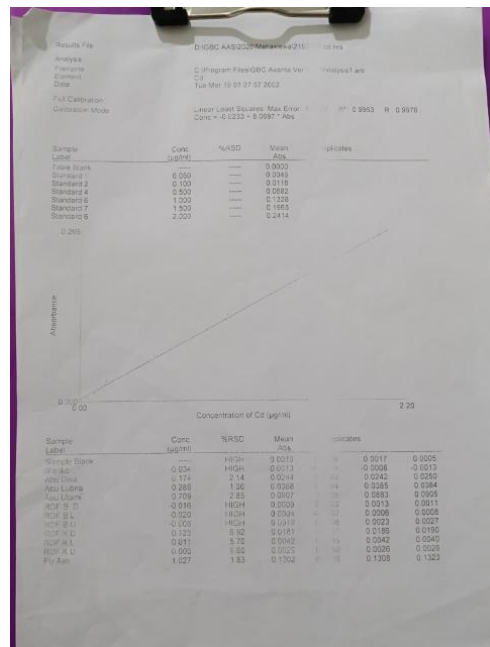
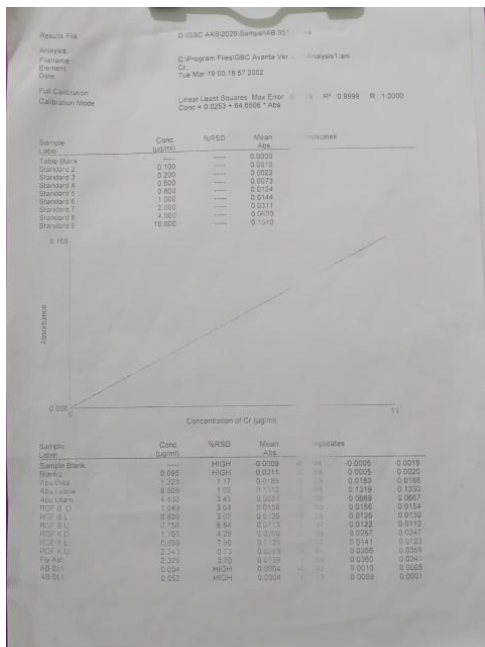
LAMPIRAN 2 Hasil Uji dan Perhitungan

a. Hasil Pembacaan AAS



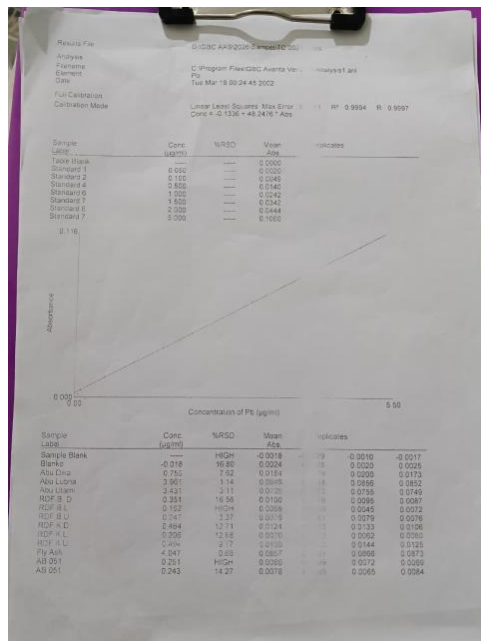
1. Seng (Zn)

2. Besi (Fe)



3. Kromium (Cr)

4. Kadmium (Cd)



5. Timbal (Pb)

b. Perhitungan Kandungan Logam Berat

Perhitungan kadar logam berdasarkan berat aktual sampel uji dengan rumus perhitungan mengacu pada SNI 8910 : 2021, dapat dihitung menggunakan rumus berikut :

$$\text{Kadar logam} \left(\frac{\text{mg}}{\text{kg}} \right) = \frac{c \times v}{w} \times fp$$

Keterangan :

c : konsentrasi sampel uji yang didapat dari SSA-Nyala (mg/L)

v : volume akhir setelah proses destruksi (mL)

w : berat sampel uji (gr)

fp : faktor pengenceran

Contoh perhitungan (parameter Zn) :

Diketahui :

$$c : 1,7995 \text{ (mg/L)}$$

$$v : 50 \text{ (mL)}$$

$$w : 2,004 \text{ (gr)}$$

$$fp : 20$$

Maka, dapat dihitung :

$$\text{Kadar logam } \left(\frac{\text{mg}}{\text{kg}} \right) = \frac{1,7995 \times 50}{2,004} \times 50$$

$$\text{Kadar logam } \left(\frac{\text{mg}}{\text{kg}} \right) = 35,2045 \text{ mg/L}$$

$$\text{Kadar logam } \left(\frac{\text{mg}}{\text{kg}} \right) = 879,94 \text{ mg/kg}$$

Untuk mengubah mg/L menjadi mg/kg, konsentrasi akhir dikali faktor pengenceran kemudian dikurangi konsentrasi akhir blanko.

1) Parameter Zn

Cons (mg/l)	Abs
0,05	0,0123
0,1	0,0239
0,2	0,0487
0,5	0,1134
1	0,2188
2	0,4420
slope (a)	0,219269
intercept (b)	0,002485

	Bobot (g)	Volume akhir (ml)	Nama Sampel	Abs	Cons (mg/L)	Faktor pengencer	Cons akhir	Cons mg/Kg
Zn		50	Blanko	0,1745	0,784	1	0,784489464	
	2,0004	50	Bottom ash	0,39705	1,7995	20	35,20453141	879,94
	0,4066	50	RDf Basah	0,1999	0,9003	5	3,717154083	457,10
	0,4476	50	RDF Kering	0,2040	0,9190	5	3,810646388	425,68

2) Parameter Fe

Cons (mg/l)	Abs
0,2	0,0080
0,8	0,0390
5	0,2330
10	0,4680
20	0,9250
slope (a)	0,046278
intercept (b)	0,001397

	Bobot (g)	Volume akhir (ml)	Nama Sampel	Abs	Cons (mg/L)	Faktor pengencer	Cons akhir	Cons mg/Kg
Fe		50	Blanko	0,0411	0,86	1	0,85791343	
	2,0004	50	Bottom ash	0,6362	13,72	5	67,72766254	1692,85
	0,4066	50	RDf Basah	0,6757	14,57	1	13,71273641	1686,27
	0,4476	50	RDF Kering	0,6311	13,61	1	12,74899856	1424,15

3) Parameter Cr

Cons (mg/l)	Abs
0,1	0,0010
0,2	0,0022
0,5	0,0073
0,8	0,0124
1	0,0144
2	0,0311
4	0,0620
10	0,1540
slope (a)	0,015471
intercept (b)	-0,00042

	Bobot (g)	Volume akhir (ml)	Nama Sampel	Abs	Cons (mg/L)	Faktor pengencer	Cons akhir	Cons mg/Kg
Cr		50	Blanko	0,0011	0,098234263	1	0,098234263	
	2,0004	50	Bottom ash	0,0681	4,428954274	1	4,330720012	108,25
	0,4066	50	RDf Basah	0,0113	0,757537906	1	0,659303644	81,08
	0,4476	50	RDF Kering	0,0359	2,347623164	1	2,249388902	251,27

4) Parameter Cd

Cons (mg/l)	Abs
0,05	0,0049
0,1	0,0118
0,5	0,0682
1	0,1328
1,5	0,1965
slope (a)	0,132283
intercept (b)	-0,0005

	Bobot (g)	Volume akhir (ml)	Nama Sampel	Abs	Cons (mg/L)	Faktor pengencer	Cons akhir	Cons mg/Kg
Cd		50	Blanko	-0,0013	-	1	-	
	2,0004	50	Bottom ash	0,0907	0,689417896	1	0,695476651	17,38
	0,4066	50	RDf Basah	0,0019	0,018131738	1	0,024190492	2,97
	0,4476	50	RDF Kering	0,0029	0,025691266	1	0,024190492	2,70

5) Parameter Pb

Cons (mg/l)	Abs
0,05	0,0020
0,1	0,0049
0,5	0,0140
1	0,0242
1,5	0,0342
2	0,0444
5	0,1060
slope (a)	0,020726
intercept (b)	0,002761

	Bobot (g)	Volume akhir (ml)	Nama Sampel	Abs	Cons (mg/L)	Faktor pengencer	Cons akhir	Cons mg/Kg
Pb		50	Blanko	0,0024	-0,0174228	1	-0,0174228	
	2,0004	50	Bottom ash	0,03695	1,53374442	2	3,08491164	77,11
	0,4066	50	RDf Basah	0,0079	0,132145423	1	0,149568223	18,39
	0,4476	50	RDF Kering	0,0130	0,378209275	1	0,395632075	44,19

c. Perhitungan Kandungan Klorin (Cl)

Cons (mg/l)	Abs
0,1	0,006
0,5	0,017
0,8	0,026
1	0,032
2	0,056
slope (a)	0,026302
intercept (b)	0,004254

RDF Kering	Bobot (g)	Volume akhir (ml)	Abs	Cons (mg/L)	Faktor pengencer	Cons akhir	Cons mg/Kg
		50	0,004	-0,0097	1	- 0,009673791	
	1,0005	50	0,025	0,7888	1	0,788751406	39,42

RDF Basah	Bobot (g)	Volume akhir (ml)	Abs	Cons (mg/L)	Faktor pengencer	Cons akhir	Cons mg/Kg
		50	0,004	-0,0097	1	- 0,009673791	
	1,0008	50	0,02	0,5987	1	0,598650169	29,91

Bottom Ash	Bobot (g)	Volume akhir (ml)	Abs	Cons (mg/L)	Faktor pengencer	Cons akhir	Cons mg/Kg
		50	0,004	-0,0097	1	-0,01	
	1,0032	50	0,007	0,1044	1	0,104386952	5,20

LAMPIRAN 3

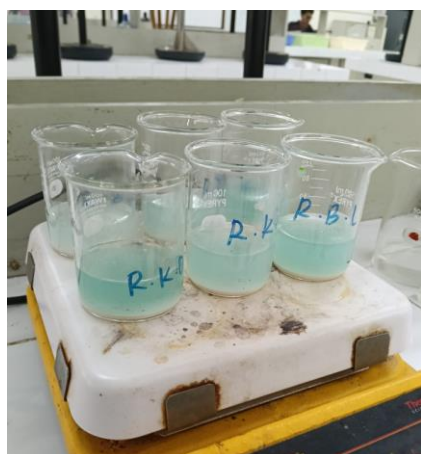
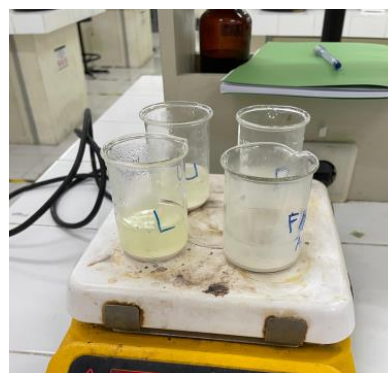
LAMPIRAN 3 Dokumentasi Penelitian



Hasil Furnace



Penimbangan sampel



Pemanasan sampel dan blanko



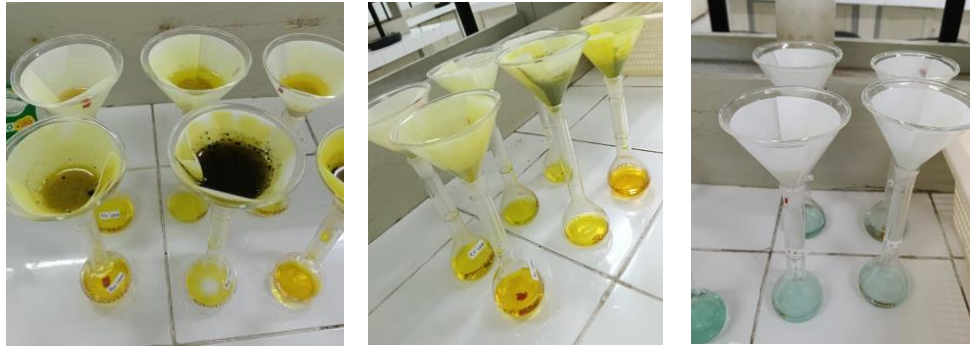
Persiapan pengujian klorin



Persiapan pengujian logam berat



Preparasi sampel di ruang asam



Penyaringan larutan dengan kertas saring



Pengambilan sampel di TPST Sendangsari

RIWAYAT HIDUP



Penulis yang bernama lengkap Riski Sri Utami lahir di Kebumen, pada tanggal 19 Maret 2004. Penulis merupakan anak pertama dari tiga bersaudara, dari pasangan Bapak Ripan dan Ibu Sri Hartati. Penulis menempuh pendidikan di SMPN 2 Gombang dan lulus pada tahun 2019. Selanjutnya, penulis melanjutkan pendidikan di SMAN 2 Rowokele dan lulus pada tahun 2022. Pada tahun yang sama, penulis melanjutkan studi di Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Selama menjalani perkuliahan, penulis aktif dalam berbagai kegiatan akademik seperti magang. Pada tahun 2024, penulis melaksanakan kegiatan magang di perusahaan KOSTAJASA dengan berfokus pada analisis kualitas mata air. Pada tahun 2025, penulis melaksanakan kegiatan magang di Pusat Pengendalian Lingkungan Hidup Jawa (Pusdal LH Jawa) dengan berfokus pada pengelolaan limbah bahan berbahaya dan beracun (B3). Pada tahun 2026, penulis melaksanakan kegiatan Kerja Praktik (KP) di TPST Tamanmartani dengan berfokus pada pengolahan sampah. Kemudian pada bulan Mei 2026 penulis melaksanakan penelitian di Laboratorium Kualitas Lingkungan FTSP UII sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik (S. T.) dengan mengambil judul “Analisis Kadar Kalor (Cl) dan Kandungan Logam Berat pada *Refuse Derived Fuel* (RDF) dan Abu Sisa Pembakaran di TPST Sendangsari, Sleman, D.I. Yogyakarta”.

Akhir kata, penulis mengucapkan terima kasih kepada orang-orang yang sudah terlibat dalam proses penyusunan Tugas Akhir ini. Tugas Akhir ini dapat terselesaikan dengan baik atas bimbingan dan arahan dari dosen pembimbing yaitu Bapak Ir. Fajri Mulya Iresha, S. T., M.T., Ph.D., I.P.M.

