

Pengaruh Variasi Laju Massa Udara dan Debit Bahan Bakar terhadap Performa Pembakaran pada Insinerator Sampah Rumah Tangga

Ikbal¹, Tika Kristianti², Sayid Bahri Sriwijaya³, Ilman Nurkamal⁴, Haikal Ubaidillah⁵
^{1,2,3,4,5}Politeknik PGRI Banten

Corresponding Author: Ikbal, e-mail: Ikbal@politeknikpgribanten.ac.id

Published: October, 2023

ABSTRAK

Permasalahan pengelolaan sampah di Indonesia terus mengalami peningkatan seiring dengan pertumbuhan penduduk, urbanisasi, dan pola konsumsi masyarakat yang semakin tinggi. Praktik pembakaran terbuka yang umum dilakukan masyarakat menimbulkan dampak negatif berupa pencemaran udara dan gangguan kesehatan akibat emisi asap yang berlebihan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja sistem pembakaran pada alat pembakar sampah minim asap guna mengetahui kondisi suhu optimum serta mengevaluasi efektivitas dan efisiensi pembakaran. Metode penelitian menggunakan pendekatan eksperimental dengan melakukan pengujian langsung terhadap prototipe insinerator berbahan bakar limbah oli bekas. Sampah yang digunakan merupakan campuran sampah organik dan non-organik ringan dari limbah rumah tangga. Parameter yang diamati meliputi temperatur tungku *burner*, temperatur ruang bakar (*chamber*), waktu pembakaran, serta persentase residu abu dan arang. Variasi laju aliran udara dan debit bahan bakar diterapkan untuk menentukan kombinasi kondisi pembakaran terbaik. Hasil pengujian menunjukkan bahwa alat mampu mencapai temperatur pembakaran maksimum $\pm 1000^{\circ}\text{C}$ pada kondisi variasi optimal. Proses pembakaran menghasilkan residu sebesar 7,2% dari total massa awal sampah, dengan efisiensi pembakaran sebesar 92,8%. Secara visual, emisi asap yang dihasilkan sangat minim dan hampir tidak berwarna. Berdasarkan hasil tersebut, alat pembakar sampah minim asap ini dinilai efektif dan efisien dalam mereduksi volume sampah serta berpotensi diterapkan sebagai solusi pengelolaan sampah skala rumah tangga yang lebih ramah lingkungan.

Kata Kunci: Insinerator, Minim asap, Pembakar sampah, Pengujian alat

© The Author(s). 2021 Open Access This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. To view a copy of this licence, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

PENDAHULUAN

Sampah merupakan material sisa dari aktivitas manusia maupun proses alam yang tidak memiliki nilai ekonomi secara langsung. Sampah dapat berupa sampah organik, anorganik, maupun limbah Bahan Berbahaya dan Beracun (B3) yang memerlukan penanganan khusus (Syafudin & Ratman, 2020). Permasalahan sampah terus meningkat dari tahun ke tahun seiring pertumbuhan penduduk. Namun, upaya pemerintah dalam penyediaan fasilitas pembuangan dan pengelolaan sampah masih terbatas sehingga menjadi persoalan yang perlu segera ditangani (Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), 2024). Penumpukan sampah tidak hanya merusak kebersihan dan estetika lingkungan, tetapi juga menimbulkan risiko kesehatan karena menjadi tempat berkembangnya organisme patogen berbahaya (Himayasari, 2021). Pemerintah Kota Cilegon mengelola sekitar 275 ton sampah per hari dengan ketersediaan lahan 11 hektar dan hanya satu TPSA di Bagendung yang kapasitasnya semakin terbatas, sehingga melalui dukungan Kementerian PUPR direncanakan pembangunan fasilitas pengelolaan sampah berteknologi modern berkapasitas 200 ton per hari guna meningkatkan efektivitas dan efisiensi pengelolaan sampah (Mahyudin, 2025). Upaya pengurangan sampah melalui metode 3R (Reduce, Reuse, Recycle) hanya mampu menekan timbunan sekitar 15-20% sehingga diperlukan metode tambahan yang lebih efektif (Nurhayati, 2020). Metode pembakaran sering dipilih karena praktis, namun pembakaran terbuka menghasilkan asap berlebih yang mencemari

udara dan berdampak buruk bagi kesehatan (Jamaluddin, 2022). Oleh karena itu, diperlukan teknologi pembakaran yang lebih optimal dan ramah lingkungan seperti insinerator.

Insinerator merupakan alat pembakar limbah padat yang bekerja melalui proses oksidasi termal untuk mengubah sampah menjadi gas dan residu abu (Abdullah, Kholik, Hidayat, & S. H. K. P., 2022). Dalam operasionalnya, insinerator umumnya menggunakan bahan bakar minyak tambahan guna meningkatkan suhu pembakaran, namun tingginya biaya operasional mendorong pemanfaatan alternatif seperti limbah oli bekas yang masih memiliki nilai kalor cukup tinggi (Lutfi, 2021). Pemanfaatan oli bekas perlu dilakukan secara terkendali karena termasuk limbah B3 yang berpotensi mencemari lingkungan apabila tidak dikelola dengan benar (Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 101 Tahun 2014 tentang Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun, 2014). Secara teknis, kinerja insinerator dipengaruhi oleh rasio udara bahan bakar dan desain ruang bakar (Zhang, Yang, Xu, Zhang, & Ren, 2025), dimana suplai udara tambahan melalui *blower* dapat meningkatkan kestabilan nyala api serta kesempurnaan pembakaran (Ding & Chen, 2025). Studi eksperimental menunjukkan bahwa temperatur pembakaran pada kisaran 900-1000°C berperan penting dalam meningkatkan stabilitas termal, efisiensi pembakaran, dan efektivitas destruksi limbah padat, serta sistem yang mampu mempertahankan temperatur tinggi secara konsisten menunjukkan performa lebih optimal (Copik, Szlęk, & Ditaranto, 2024; Liu, Zhu, Asim, & Mishra, 2024). Pada skala portabel, temperatur mendekati 980°C juga terbukti meningkatkan efektivitas pembakaran limbah medis dan menjaga kestabilan proses termal (Endah Agustina, A.Pane, F.Nurcholis, & Arviansyah, 2022).

Dalam konteks bahan bakar cair alternatif, *used lubricating oil* (WLO) dengan nilai kalor sekitar 41-42 MJ/kg mampu menghasilkan temperatur nyala hingga 1200°C ketika dikombinasikan dengan rasio udara bahan bakar yang optimal (Makworo, Kiplimo, Hawi, & Owiti, 2022), dan optimasi simultan laju aliran udara serta debit bahan bakar terbukti meningkatkan efisiensi termal dan kestabilan pembakaran secara signifikan (Sahbudin, Hermawan, & Sutejo, 2024). Secara teknis, pengaturan laju aliran massa udara dan debit bahan bakar cair memengaruhi karakteristik temperatur api, distribusi panas, dan performa sistem pembakaran. Peningkatan air flow rate terbukti meningkatkan intensitas reaksi dan temperatur ruang bakar (García Sánchez, Chacón Velasco, & Fuentes Díaz, 2024), sementara distribusi secondary air yang tepat dapat meningkatkan efisiensi termal hingga sekitar 91% pada sistem industri (Du dkk., 2022). Namun, sebagian besar penelitian masih dilakukan pada skala laboratorium atau industri besar dengan kontrol otomatis dan pendekatan berbasis optimasi emisi maupun performa termal skala besar (Liu dkk., 2024; Makworo dkk., 2022). Oleh karena itu, kajian kuantitatif mengenai temperatur optimum dan rendemen abu pada insinerator kapasitas menengah berbasis komunitas dengan pengaturan manual masih terbatas dan memerlukan investigasi lebih lanjut.

Meskipun teknologi insinerator telah banyak dikembangkan, masih terdapat permasalahan pada sistem pembakaran yang belum mencapai kondisi optimum sehingga menghasilkan emisi asap yang tinggi (DeMarini & Linak, 2022; Zhang dkk., 2025). Banyak alat pembakar sampah yang beredar belum memiliki pengaturan rasio udara dan bahan bakar yang teruji secara eksperimental (Liu dkk., 2024; Yuvenda dkk., 2022). Selain itu, pengujian performa insinerator berbahan bakar oli bekas tanpa proses treatment masih relatif terbatas (Chidambaram, Krishnasamy, Duraisamy, & Hossain, 2023; Herrapstanti, Saputra, Suryanto, & Ashraf, 2023). Studi sebelumnya belum banyak mengevaluasi variasi laju aliran udara dan debit bahan bakar secara simultan untuk menentukan titik suhu optimum pembakaran (Idris, Setyawan, & Suharto, 2025; Valea, Compaoré, Zoundi, & Nzihou, 2024). Keterbatasan lainnya adalah belum adanya analisis kuantitatif terhadap karakteristik temperatur api sebagai indikator efisiensi pembakaran pada skala komunitas (Yulianto, Hartulistiyoso, Nelwan, Agustina, & Gupta, 2023). Oleh karena itu, diperlukan penelitian eksperimental yang terstruktur untuk menguji dan menganalisis parameter operasional tersebut. Penelitian ini berupaya mengisi kesenjangan tersebut melalui pengujian langsung terhadap variasi laju aliran udara dan bahan bakar.

Penelitian ini memiliki urgensi yang tinggi seiring dengan meningkatnya volume sampah rumah tangga serta keterbatasan kapasitas pengelolaan di tingkat daerah, terutama pada wilayah dengan ketersediaan lahan TPA yang terbatas. Optimalisasi kinerja *incinerator* skala komunitas menjadi salah satu alternatif solusi yang potensial dalam mendukung sistem pengelolaan sampah yang lebih efektif dan efisien. Kebaruan penelitian ini terletak pada pemanfaatan limbah oli bekas tanpa proses

treatment sebagai bahan bakar alternatif pada *incinerator* kapasitas 70 kg. Selain itu, penelitian ini melakukan analisis eksperimental terhadap pengaruh variasi laju aliran massa udara menggunakan sistem *blower* untuk memperoleh kondisi suhu pembakaran yang optimal. Evaluasi kinerja pembakaran dilakukan berdasarkan parameter suhu optimum dan efisiensi operasional alat pada skala komunitas. Pendekatan tersebut diharapkan mampu memberikan kontribusi teknis dalam pengembangan desain *incinerator* yang lebih ekonomis, adaptif, dan aplikatif sesuai dengan kebutuhan pengelolaan sampah di tingkat lokal.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja sistem pembakaran pada alat pembakar sampah minim asap berbahan bakar limbah oli bekas guna memperoleh kondisi operasional yang optimum, efektif, dan efisien dalam meningkatkan temperatur pembakaran serta meminimalkan emisi asap. Secara khusus, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi dan menentukan parameter pengaturan laju aliran udara dan debit bahan bakar yang berpengaruh terhadap pencapaian suhu pembakaran optimum. Selain itu, penelitian ini diarahkan untuk mengevaluasi performa termal alat sebagai dasar pengembangan desain dan peningkatan efisiensi insinerator minim asap berbasis komunitas. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi teknis dan ilmiah dalam optimalisasi sistem pembakaran insinerator skala masyarakat yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan.

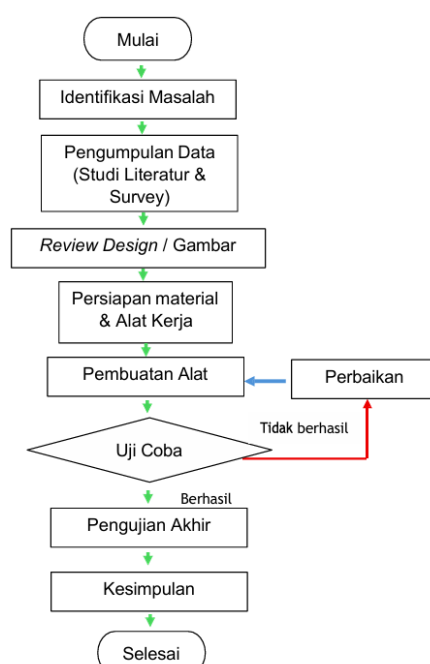
METODE

Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif eksperimental untuk mengevaluasi kinerja pembakaran *incinerator* limbah berasap rendah yang menggunakan minyak bekas sebagai bahan bakar (Maithomklang, Sukjit, Srisertpol, Klinkaew, & Wathakit, 2023). Penelitian ini dirancang sebagai uji kinerja eksperimental yang bertujuan untuk menentukan kondisi pembakaran optimal berdasarkan variasi laju aliran udara dan laju aliran bahan bakar. Penyelidikan ini berfokus pada identifikasi karakteristik suhu pembakaran, laju pembakaran, konsumsi bahan bakar, hasil residu, dan efisiensi pembakaran secara keseluruhan. Desain eksperimental melibatkan manipulasi terkontrol terhadap variabel independen sambil mempertahankan parameter kontrol konstan untuk menentukan pengaruhnya terhadap kinerja pembakaran.

Diagram Alir Penelitian

Untuk menjelaskan tahapan perancangan dan pelaksanaan penelitian secara sistematis, disusun diagram alir rancangan penelitian yang menggambarkan alur kegiatan sejak tahap identifikasi masalah hingga pengujian akhir alat.



Gambar 1. Diagram Alir Rancangan

Berdasarkan diagram alir rancangan tersebut, penelitian diawali dengan identifikasi masalah dan pengumpulan data melalui studi literatur serta survei lapangan. Tahap selanjutnya adalah *review* desain alat pembakar sampah minim asap sebelum dilakukan persiapan material dan alat kerja. Setelah alat selesai dibuat, dilakukan uji coba awal untuk mengetahui apakah sistem berfungsi sesuai rancangan. Apabila hasil uji coba belum memenuhi kriteria, dilakukan perbaikan sebelum dilanjutkan ke tahap pengujian akhir.

Selain diagram rancangan, penelitian ini juga dilengkapi dengan diagram alir pengujian yang menggambarkan prosedur eksperimen pembakaran secara operasional.



Gambar 2. Diagram Alir Pengujian

Diagram alir pengujian tersebut menunjukkan bahwa proses eksperimen dimulai dari persiapan alat dan bahan, dilanjutkan dengan penyalaan tungku api sebagai tahap awal pembakaran. Setelah api stabil, dilakukan pengaturan laju aliran udara dan debit bahan bakar sesuai variasi yang telah ditentukan. Pada setiap kombinasi variasi dilakukan pengumpulan data berupa temperatur, karakteristik asap, serta residu pembakaran. Data yang diperoleh kemudian dianalisis untuk menentukan kondisi pembakaran optimum dan efisiensi alat.

Lokasi dan Waktu Penelitian

Uji coba eksperimental dilakukan di Kantor Desa Gunung Sugih, Kecamatan Ciwandan, Kota Cilegon, Indonesia, yang berlokasi dekat dengan Tempat Pembuangan Sampah Sementara (TPS). Uji coba dilakukan setelah proses pembuatan dan perakitan prototipe *incinerator* selesai. Uji kinerja pembakaran dilakukan selama kurang lebih tiga minggu dalam kondisi operasional yang terkendali.

Variabel Penelitian

Variabel-variabel dalam studi ini terdiri dari variabel independen, variabel dependen, dan variabel kontrol. Variabel independen meliputi persentase pembukaan *blower*, yang bervariasi antara 25% dan 100%, serta persentase pembukaan katup bahan bakar minyak bekas, yang bervariasi antara 15% dan 60%. Variabel dependen yang diukur dalam studi ini meliputi suhu pembakaran, volume asap yang diamati secara visual, dan efisiensi pembakaran berdasarkan abu sisa. Sementara itu, variabel kontrol yang tetap konstan sepanjang eksperimen adalah jenis pembakar yang digunakan dan penggunaan minyak bekas sebagai sumber bahan bakar selama seluruh prosedur pengujian.

Bahan, Alat, dan Instrumen

1. Bahan

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari minyak pelumas bekas yang belum diolah sebagai bahan bakar cair utama untuk sistem pembakar. Minyak bekas tersebut diperoleh dari bengkel kendaraan lokal dan digunakan tanpa proses pengolahan sebelumnya. Bahan-bahan mudah terbakar tambahan seperti kertas, kain, dan kayu kering digunakan pada tahap pembakaran awal untuk memicu pembentukan api. Beban pembakaran terdiri dari limbah rumah tangga campuran yang dikumpulkan dari kawasan Gunung Sugih, termasuk limbah dapur organik dan limbah non-organik ringan seperti kemasan plastik dan botol plastik. Massa limbah disesuaikan dengan kapasitas ruang pembakaran selama setiap siklus eksperimen.

2. Alat dan Instrumen

Peralatan utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah prototipe *incinerator* limbah berasap rendah yang dilengkapi dengan sistem pembakar yang menggunakan minyak bekas sebagai bahan

bakar dan disuplai dengan udara pembakaran tambahan dari *blower* listrik. Alat dan instrumen pengukuran yang digunakan selama proses eksperimental diuraikan di bawah ini.



Gambar 3. *Blower*

Blower listrik berukuran 2 inci (220 V) yang digunakan untuk memasok dan mengatur aliran udara pembakaran ke sistem pembakar.



Gambar 4. Termometer Digital TM-902C

Termometer digital yang dilengkapi dengan probe thermocouple untuk mengukur suhu pada *burner* dan ruang pembakaran hingga $\geq 1000^{\circ}\text{C}$.



Gambar 5. Anemometer GM816

Alat ukur kecepatan udara yang digunakan untuk menentukan laju aliran udara dari *blower*, yang selanjutnya digunakan untuk menghitung laju aliran massa udara.



Gambar 6. *Stopwatch*

Digunakan untuk mengukur lama waktu pembakaran serta interval waktu pada pengukuran debit bahan bakar.



Gambar 7. Timbangan

Digunakan untuk mengukur massa awal sampah dan massa residu abu serta arang setelah proses pembakaran.



Gambar 8. Gelas Ukur (500 ml)

Digunakan untuk mengukur volume aliran bahan bakar oli bekas selama pengujian debit bahan bakar.



Gambar 9. Wadah Bahan Bakar (Jerigen) dengan Katup Pengatur

Digunakan untuk menyimpan oli bekas dan mengatur laju aliran bahan bakar menuju sistem *burner*.

Prosedur Pengujian

Prosedur pengujian dilakukan melalui beberapa tahapan sistematis yang meliputi persiapan alat, penyalan awal, pelaksanaan uji variasi, serta pengambilan dan pencatatan data kinerja pembakaran. Tahap pertama adalah persiapan dan pengoperasian awal alat pembakar sampah. Seluruh peralatan penelitian dirangkai terlebih dahulu, yang terdiri atas wadah bahan bakar, *burner set*, tungku pembakaran (*chamber*), serta alat pengukur suhu berupa termometer digital. Setelah perakitan selesai, dilakukan pemeriksaan untuk memastikan seluruh komponen berada dalam kondisi siap digunakan. *Blower* dipastikan telah terhubung dengan sumber listrik bertegangan 220 volt, sedangkan wadah bahan bakar dan keran oli telah terhubung dengan pipa saluran menuju *burner*.

Selanjutnya dilakukan proses penyalan awal. Sejumlah kecil oli dimasukkan ke dalam *burner*, kemudian api dinyalakan menggunakan media yang mudah terbakar seperti potongan kayu, kertas, atau daun kering. Pada tahap pemantik awal, keran oli dibuka sekitar 5% untuk mempermudah pembentukan nyala api. Setelah api menyala dan suhu *burner* mencapai lebih dari 300°C, keran bahan bakar mulai dibuka secara bertahap dan *blower* dinyalakan untuk mensuplai udara pembakaran. Setelah nyala api stabil, *blower* diatur sesuai variasi pengujian yang telah ditentukan.

Tahap pelaksanaan uji dilakukan dengan mengombinasikan variasi pembukaan *blower* dan pembukaan katup bahan bakar oli bekas sesuai dengan parameter yang telah diukur sebelumnya. Kecepatan aliran udara yang telah ditentukan menjadi acuan dalam mengatur debit udara, sedangkan pembukaan katup bahan bakar menjadi acuan dalam menentukan debit aliran oli per satuan waktu. Pada setiap perubahan parameter laju udara dan bahan bakar, suhu diukur pada ujung *burner* menggunakan termometer digital yang dilengkapi thermocouple.

Selama proses pengujian berlangsung, dilakukan pengamatan dan pencatatan terhadap temperatur pembakaran, karakteristik nyala api, warna asap yang dihasilkan, serta sisa pembakaran. Dokumentasi visual juga dilakukan untuk mendukung analisis kualitatif terhadap intensitas dan warna asap. Proses ini didukung dengan dokumentasi yang ditunjukkan berikut:



Gambar 10. Pembukaan *Blower*



Gambar 11. Pengukuran Laju Udara



Gambar 12. Bahan Bakar Oli



Gambar 14. Nyala Burner



Gambar 16. Sisa Pembakaran



Gambar 13. Pengukuran Suhu



Gambar 15. Tungku Chamber

Tahap terakhir adalah pengambilan data dan analisis parameter kinerja. Suhu maksimum yang dicapai selama proses pembakaran dicatat, termasuk warna asap dan jumlah residu berupa abu yang dihasilkan. Massa residu kemudian digunakan untuk menghitung efisiensi pembakaran alat. Selain itu, dokumentasi visual terhadap warna dan intensitas asap digunakan sebagai indikator evaluasi performa alat dalam meminimalkan emisi secara kualitatif. Dengan prosedur ini, data yang diperoleh dapat digunakan untuk menentukan kondisi pembakaran optimum berdasarkan variasi laju aliran udara dan bahan bakar.

Teknik Analisis Data

Analisis data dalam penelitian ini dilakukan dengan pendekatan kuantitatif deskriptif (Ellappan dkk., 2024). Data hasil pengujian pembakaran yang diperoleh selama eksperimen disusun secara sistematis dalam bentuk tabel dan selanjutnya disajikan dalam bentuk grafik untuk mempermudah proses perbandingan antar variasi laju aliran udara dan laju aliran bahan bakar. Analisis dilakukan untuk menentukan kondisi suhu pembakaran optimum berdasarkan suhu tertinggi yang dicapai secara stabil pada setiap variasi pengujian. Selain itu, efisiensi alat dievaluasi melalui perbandingan antara massa awal sampah yang dibakar dengan massa residu akhir berupa abu yang dihasilkan. Perbandingan tersebut digunakan untuk menilai tingkat reduksi massa sampah sebagai indikator kinerja pembakaran. Tingkat polusi visual juga dianalisis secara kualitatif berdasarkan pengamatan terhadap volume dan intensitas asap yang dihasilkan selama proses pembakaran berlangsung. Integrasi antara data suhu, perhitungan residu, dan observasi visual asap digunakan untuk memberikan gambaran menyeluruh mengenai performa alat pembakar sampah minim asap pada berbagai kondisi operasional.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Uji Coba

Uji coba dilakukan untuk mengetahui apakah alat pembakar sampah (*incinerator*) berbahan bakar limbah oli bekas dapat berfungsi dengan baik serta untuk mengetahui titik optimum pembakaran. Pengujian dilakukan dalam dua tahap, yaitu uji coba tanpa beban dan uji coba dengan beban 18 kg sampah. Setiap pengujian diawali dengan proses penyalaan awal *burner* menggunakan ± 20 ml oli bekas sebagai pemantik, kemudian dilakukan variasi laju aliran udara dan bahan bakar untuk memperoleh temperatur maksimum.

Uji coba tanpa beban dilakukan untuk mengevaluasi kinerja awal seluruh komponen pada alat serta memperoleh data dasar sebagai acuan pada tahap pengujian berikutnya. Tahapan ini meliputi

pengukuran laju aliran udara pada beberapa variasi tingkat pembukaan katup, serta pengukuran debit fluida bahan bakar berupa oli bekas.

Tabel 1. Uji Coba Alat

No	Nama Komponen	Keterangan
1.	<i>Blower</i>	Berfungsi
2.	Keran Oli	Berfungsi
3.	Pipa saluran Oli	Berfungsi
4.	Pipa saluran udara	Berfungsi
5.	Anemometer	Berfungsi
6.	<i>Thermometer+ Thermocouple</i>	Berfungsi

Berdasarkan hasil uji coba awal yang disajikan pada Tabel 1, seluruh komponen utama alat, meliputi *blower*, keran oli, pipa saluran oli, pipa saluran udara, anemometer, serta *thermometer* dan *thermocouple*, berfungsi dengan baik sesuai dengan spesifikasi operasional. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem telah siap digunakan pada tahap pengujian selanjutnya.

Pengukuran Kecepatan Udara

Pengukuran dilakukan menggunakan anemometer GM816 pada pipa udara diameter 2 inci (0,0508 m).

Tabel 2. Data Pengukuran Kecepatan Udara

No	Pembukaan katup <i>Blower</i>	Kecepatan Udara (V air)
1.	25%	10,4 m/s
2.	50%	12,1 m/s
3.	75%	13,3 m/s
4.	100%	14,2 m/s

Berdasarkan Tabel 2, terlihat bahwa peningkatan persentase pembukaan katup *blower* berbanding lurus dengan kenaikan kecepatan aliran udara. Kecepatan udara terukur sebesar 10,4 m/s pada pembukaan 25% dan meningkat secara bertahap hingga mencapai 14,2 m/s pada pembukaan 100%. Hasil ini menunjukkan bahwa variasi pembukaan katup memberikan pengaruh signifikan terhadap karakteristik aliran udara yang dihasilkan.

Data kecepatan udara pada setiap variasi pembukaan katup selanjutnya digunakan untuk menentukan laju aliran massa udara. Parameter ini dihitung guna memperoleh gambaran kuantitatif mengenai karakteristik aliran dalam sistem, yang menjadi dasar dalam evaluasi performa alat secara keseluruhan.

$$M = \rho_{air} \times V_{air} \times A$$

Dengan:

M = laju aliran massa dari udara (kg/s)

ρ_{air} = massa jenis udara (kg/m³)

V_{air} = laju kecepatan udara (m/s)

A = luas penampang yang dilalui (m²)

Untuk menghitung laju aliran massa (m) hitung terlebih dulu luas penampang pipa ukuran 2 inc, yaitu:

Diketahui diameter pipa 2 inc,

1 inci = 0,0254 m, jadi diameter pipa 2 x 0,0254 m = 0,0508 m Maka luas penampang A,

$$A = \pi r^2$$

$$A = 3,14 \times 0,0254^2$$

$$A = 0,002026 \text{ m}^2$$

Untuk massa jenis udara (ρ_{air}) 1,2 kg/m³

Adapun dari hasil pengukuran didapat data sebagai berikut:

Tabel 3. Kecepatan Udara, Massa Jenis Udara, Luas Penampang, dan Laju Aliran Massa Udara

Kecepatan udara (V_{air})	Masa jenis udara (ρ_{air})	Luas penampang (A)	Laju aliran massa udara (kg/s)
10,4 m/s	1,2 kg/m ³	0,002026m ²	0,02528 kg/s
12,1 m/s	1,2 kg/m ³	0,002026m ²	0,02937 kg/s

13,3 m/s	1,2 kg/m ³	0,002026m ²	0,03233 kg/s
14,2 m/s	1,2 kg/m ³	0,002026m ²	0,03451 kg/s

Berdasarkan Tabel 3, nilai laju aliran massa udara mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya kecepatan aliran udara. Pada kecepatan 10,4 m/s diperoleh laju aliran massa sebesar 0,02528 kg/s, sedangkan pada kecepatan 14,2 m/s meningkat menjadi 0,03451 kg/s. Hal ini menunjukkan bahwa laju aliran massa udara berbanding lurus dengan kecepatan aliran, dengan asumsi massa jenis udara dan luas penampang tetap konstan.

Pengukuran Debit dan Laju Massa Bahan Bakar Oli Bekas

Tahapan awal dalam menentukan laju aliran massa bahan bakar oli bekas dilakukan dengan menghitung debit aliran fluida terlebih dahulu. Pengukuran debit dilakukan menggunakan gelas ukur sebagai alat bantu untuk mengetahui volume fluida yang mengalir dalam selang waktu tertentu. Secara matematis, debit aliran (Q) dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$Q = \frac{V}{t}$$

di mana:

Q = Debit aliran fluida (m³/s)

V = Volume fluida yang mengalir (m³)

t = Waktu (s)

Nilai debit diperoleh dengan membagi volume bahan bakar oli bekas yang tertampung dalam gelas ukur terhadap waktu pengukuran dalam satuan detik. Setelah nilai debit aliran diperoleh, langkah selanjutnya adalah menghitung laju aliran massa bahan bakar. Perhitungan laju aliran massa dilakukan dengan mengalikan massa jenis bahan bakar (ρ) dengan debit aliran (Q), kemudian disesuaikan dengan faktor konversi satuan apabila debit dinyatakan dalam liter per detik. Persamaan laju aliran massa dirumuskan sebagai berikut:

$$m = \frac{\rho \times Q_{debit}}{1000}$$

dengan:

m = Laju aliran massa bahan bakar (kg/s)

ρ = Massa jenis bahan bakar oli bekas (kg/m³)

Q_{debit} = Debit aliran bahan bakar (l/s)

Pembagian dengan faktor 1000 dilakukan untuk mengonversi satuan liter ke meter kubik agar konsisten dengan satuan internasional (SI). Melalui tahapan ini, diperoleh nilai laju aliran massa bahan bakar oli bekas yang selanjutnya digunakan dalam analisis performa sistem pembakaran atau evaluasi efisiensi energi pada penelitian.

Tabel 4. Data Volume, Debit dan Laju Massa Bahan Bakar

Volume	Bukaan Kran	Debit (m ³ /s)	Mass jenis bahan bakar (kg/m ³)	Laju aliran massa bahan bakar (kg/s)
300 ml	15%	0,000005	900	0,0045
600 ml	30%	0,000010	900	0,0090
800 ml	45%	0,000013	900	0,0117
1000 ml	60%	0,0166	900	0,0150

Berdasarkan Tabel 4, terlihat bahwa peningkatan bukaan kran bahan bakar menyebabkan kenaikan volume fluida yang mengalir, yang selanjutnya berdampak pada peningkatan nilai debit dan laju aliran massa bahan bakar. Pada bukaan 15% diperoleh laju aliran massa sebesar 0,0045 kg/s, sedangkan pada bukaan 60% meningkat menjadi 0,0150 kg/s. Dengan massa jenis bahan bakar yang konstan sebesar 900 kg/m³, kenaikan laju aliran massa dipengaruhi secara langsung oleh bertambahnya debit aliran.

Variasi Percobaan

Setelah dilakukan pengukuran debit dan laju aliran massa bahan bakar oli bekas, tahap selanjutnya adalah melakukan variasi percobaan dengan mengombinasikan perubahan debit aliran bahan bakar dan kecepatan udara. Setiap kombinasi parameter diuji secara sistematis untuk

menganalisis pengaruhnya terhadap suhu pembakaran yang dihasilkan. Percobaan dilakukan hingga diperoleh kombinasi debit bahan bakar dan kecepatan udara yang menghasilkan temperatur maksimum sebagai indikator kondisi pembakaran paling optimal.

Tabel 5. Data Variasi Percobaan

Variasi percobaan	1	2	3	4
A (laju massa bahan bakar)	0,0045 kg/s	0,0090 kg/s	0,0117 kg/s	0,0150 kg/s
B (kecepatan udara)	10,4 m/s	12,1 m/s	13,3 m/s	14,2 m/s
Suhu	880 °C	931 °C	964 °C	1007 °C

Berdasarkan tabel 5 diatas, diperoleh empat variasi kombinasi antara laju aliran massa bahan bakar dan kecepatan udara sebagai berikut:

1. A1–B1 : laju aliran massa bahan bakar 0,0045 kg/s dengan kecepatan udara 10,4 m/s.
2. A2–B2 : laju aliran massa bahan bakar 0,0090 kg/s dengan kecepatan udara 12,1 m/s.
3. A3–B3 : laju aliran massa bahan bakar 0,0117 kg/s dengan kecepatan udara 13,3 m/s.
4. A4–B4 : laju aliran massa bahan bakar 0,0150 kg/s dengan kecepatan udara 14,2 m/s.

Variasi tersebut dirancang untuk menganalisis pengaruh peningkatan laju massa bahan bakar dan suplai udara terhadap temperatur pembakaran yang dihasilkan di dalam ruang bakar insinerator. Peningkatan kedua parameter ini secara teoritis akan memengaruhi rasio udara bahan bakar (*air-fuel ratio*) yang berperan penting dalam menentukan kestabilan nyala api dan intensitas panas pembakaran. Pada tahap proses kerja insinerator ini adalah tahap prosedur dalam melakukan pengujian pembakaran sampah. Prosedur pelaksanaan dirancang secara terkontrol sebagai berikut:

1. Sampel limbah berupa campuran sampah organik dan nonorganik ringan (plastik kemasan dan sisa organik rumah tangga) dimasukkan ke dalam ruang bakar sesuai kapasitas alat, yaitu sekitar 18 kg per siklus pembakaran.
2. Proses pembakaran diawali dengan menyalakan *burner* berbahan bakar limbah oli bekas hingga mencapai kondisi nyala stabil (± 5 menit), kemudian *burner* ditempatkan pada bagian bawah tungku pembakaran.
3. Pengambilan data temperatur dilakukan setelah kondisi pembakaran stabil, ditandai dengan suhu ruang bakar yang konstan dan berkurangnya asap pada cerobong. Pengukuran dilakukan pada titik yang telah ditentukan di ruang bakar utama.
4. Temperatur *burner* diukur menggunakan termometer digital TM-902C yang dilengkapi thermocouple untuk memastikan akurasi pengukuran suhu tinggi.
5. Residu hasil pembakaran (arang dan abu) dikeluarkan melalui pintu pembuangan pada bagian bawah *chamber*, kemudian dilakukan pembersihan sebelum siklus pembakaran berikutnya.

Pengukuran Suhu Tungku *Burner*

Pengujian temperatur dilaksanakan selama 25 menit dengan menggunakan termometer digital TM-902C. Ujung sensor (*probe*) *thermocouple* ditempatkan langsung di dalam tungku untuk memperoleh data suhu pembakaran secara akurat. Dokumentasi proses pengukuran suhu pada *burner* ditampilkan pada gambar berikut.:



Gambar 17. Pengukuran Suhu

Hasil pengujian temperatur pada tungku *burner* menunjukkan nilai suhu maksimum dan minimum yang diperoleh pada variasi A1-B1 dan A4-B4. Rincian data temperatur tersebut disajikan secara lengkap pada Tabel 6 dan Tabel 7.

Tabel 6. Suhu Rata-Rata Variasi A1-B1

Percobaan	Waktu (menit)	Suhu rata-rata °C
1	5	432
2	10	448
3	15	468
4	20	495
5	25	532

Berdasarkan data temperatur tungku *burner* pada variasi A1-B1 dengan laju aliran massa bahan bakar sebesar 0,0045 kg/s dan kecepatan udara 10,4 m/s, pengukuran dilakukan setelah *burner* mencapai kondisi nyala stabil (5 menit). Suhu awal yang tercatat sebesar 432°C. Seiring berlangsungnya proses pembakaran, temperatur mengalami peningkatan hingga mencapai 532°C pada menit ke-25. Dengan demikian, pada variasi A1-B1 diperoleh suhu maksimum sebesar 532°C dan suhu minimum sebesar 432°C pada awal pengukuran.

Tabel 7. Suhu Rata-Rata Variasi A1-B1

Percobaan	Waktu(mnt)	Suhu rata-rata °C
1	5	841
2	10	890
3	15	967
4	20	997
5	25	1007

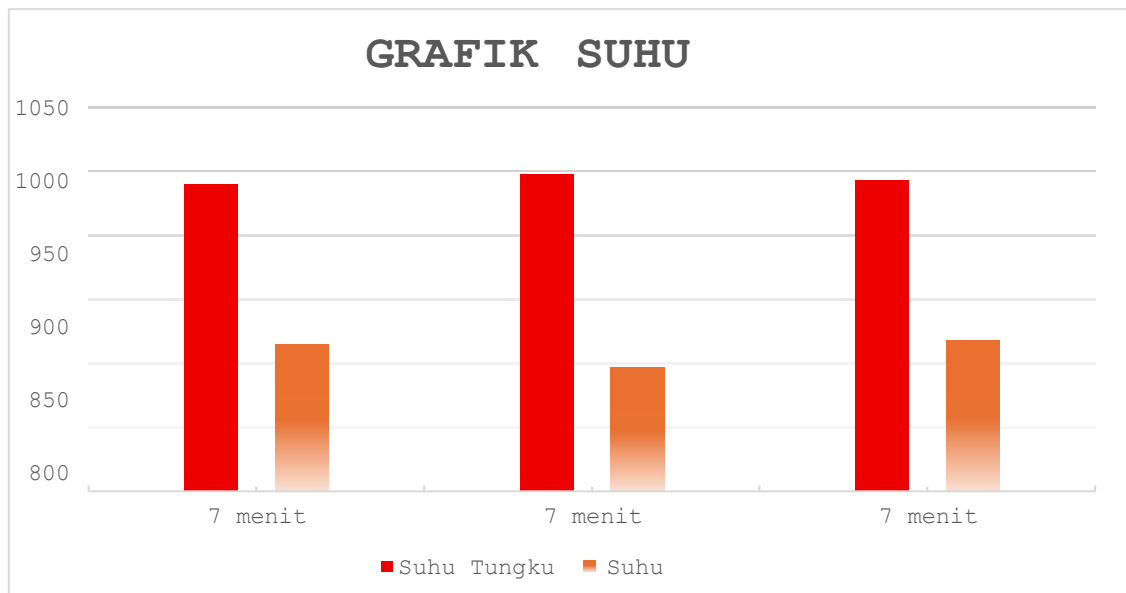
Berdasarkan hasil pengujian pada variasi A4-B4 dengan laju aliran massa bahan bakar sebesar 0,0150 kg/s dan kecepatan udara 14,2 m/s, pengukuran temperatur dilakukan setelah *burner* mencapai kondisi nyala stabil (5 menit). Suhu awal yang tercatat sebesar 841°C. Selama proses pembakaran berlangsung, temperatur mengalami peningkatan hingga mencapai 1007°C pada menit ke-25. Dengan demikian, pada variasi A4-B4 diperoleh suhu maksimum sebesar 1007°C dan suhu minimum sebesar 841°C pada awal pengukuran.

Pengukuran Suhu *Chamber*

Pengujian insinerator selanjutnya dilakukan dengan menggunakan sampel limbah rumah tangga berupa campuran sampah ringan (plastik, sisa kemasan, botol plastik) dan limbah organik dapur dengan total massa sekitar 18 kg. Proses pembakaran dilakukan secara bertahap, masing-masing 6 kg per siklus dengan durasi 7 menit, pada ruang bakar berukuran 590 mm × 900 mm.

Tabel 8. Pengujian Pembakaran Sampah

Pengujian Percobaan Sampah Limbah Rumah Tangga			
Percobaan ke	Waktu	Suhu <i>Burner</i> °C	Suhu <i>Chamber</i> °C
1	7 menit	990,1	865,3
2	7 menit	998,4	847,9
3	7 menit	993,2	868,1



Gambar 18. Grafik Suhu 3 Kali Pengujian

Berdasarkan tiga kali pengujian pembakaran limbah rumah tangga (campuran organik dan nonorganik ringan), diperoleh residu abu sebesar 1,3 kg dari total massa sampah sekitar 18 kg. Proses pembakaran berlangsung selama 0,21 jam (21 menit), menunjukkan tingkat reduksi massa yang signifikan pada ruang bakar insinerator.

Evaluasi kinerja insinerator dilakukan berdasarkan beberapa parameter utama sebagai berikut:

1. Laju Pembakaran

Laju pembakaran menunjukkan kemampuan alat dalam mengolah sampah per satuan waktu dan dihitung menggunakan persamaan:

$$Bbt = \frac{m(kg)}{t(jam)}$$

dengan:

Bbt = laju pembakaran (kg/jam)

m = massa sampah yang dibakar (kg)

t = waktu pembakaran (jam)

$$Bbt = \frac{18(kg)}{0,21(jam)} = 85 \text{ kg/jam}$$

2. Rendemen Arang

Rendemen arang menunjukkan persentase residu padat berupa arang terhadap massa awal sampah:

$$Arang(\%) = \frac{\text{bobot arang}}{\text{bobot sampah}} \times 100\%$$

$$Arang(\%) = \frac{0,2 \text{ kg}}{18 \text{ kg}} \times 100\%$$

$$\text{Rendemen Arang} = 1,1\%$$

3. Rendemen Abu

Rendemen abu dihitung untuk mengetahui sisa material anorganik setelah proses pembakaran:

$$Abu(\%) = \frac{\text{bobot abu}}{\text{bobot sampah}} \times 100\%$$

$$Abu(\%) = \frac{1,1 \text{ kg}}{18 \text{ kg}} \times 100\%$$

$$\text{Rendemen Abu} = 6,1\%$$

4. Konsumsi Bahan Bakar

Konsumsi bahan bakar dihitung berdasarkan selisih volume bahan bakar sebelum dan sesudah proses pembakaran:

$$\begin{aligned} \text{Fuel Consumption} &= V_{awal} - V_{akhir} \\ \text{Fuel Consumption} &= 4 \text{ liter} - 1 \text{ liter} = 3 \text{ liter} \end{aligned}$$

5. Efisiensi Alat

Efisiensi insinerator ditentukan berdasarkan persentase reduksi massa sampah yang tidak menjadi residu padat, dirumuskan sebagai:

$$Efisiensi\ alat(\%) = 100\% - (\%Rendemen\ arang + \%Rendemen\ abu)$$

Pada pengujian pembakaran limbah rumah tangga yang terdiri atas campuran sampah organik dan nonorganik ringan, diperoleh nilai efisiensi insinerator sebagaimana hasil perhitungan berikut:

$$Efisiensi = 100\% - (6,1\% + 1,1\%)$$

$$Efisiensi = 100\% - 7,2\%$$

$$Efisiensi = 92,8\%$$

KESIMPULAN

Insinerator yang dirancang terdiri atas enam komponen utama, yaitu ruang pembakaran utama (*chamber*), tungku *burner*, cerobong asap, lubang suplai udara, serta ruang pengendapan zat padat. Berdasarkan hasil pengujian, temperatur tertinggi tungku *burner* mencapai 1007°C pada variasi A4-B4 dalam waktu 25 menit, dengan kecepatan udara 14,2 m/s dan laju aliran massa bahan bakar sebesar 0,0150 kg/s. Pada pengujian pembakaran limbah rumah tangga campuran (basah dan kering) sebanyak 18 kg, sampah habis terbakar dalam waktu 15 menit dengan temperatur tungku *burner* sebesar 993,2°C dan temperatur ruang *chamber* sebesar 868,1°C. Konsumsi bahan bakar tercatat sebesar 3 liter dengan laju pembakaran 85 kg/jam. Rendemen sisa pembakaran sebesar 7,2% menghasilkan efisiensi pembakaran sebesar 92,8%. Secara visual, emisi asap yang dihasilkan sangat minimal dan hampir tidak berwarna, yang mengindikasikan proses pembakaran berlangsung relatif baik.

Berdasarkan hasil tersebut, beberapa rekomendasi pengembangan dapat dilakukan untuk meningkatkan kinerja alat. Optimalisasi sistem peredam panas pada tungku *burner* diperlukan guna menjaga kestabilan dan peningkatan temperatur pembakaran. Selain itu, desain pengarah aliran api pada ruang *chamber* perlu disempurnakan agar distribusi panas lebih merata ke seluruh sudut ruang bakar. Modifikasi pada sistem pembuangan atau filtrasi gas buang juga disarankan untuk menurunkan temperatur emisi sebelum dilepaskan ke lingkungan. Terakhir, penambahan roda pada kaki penyangga alat dapat meningkatkan mobilitas dan kemudahan operasional insinerator di lapangan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, Kholik, D., Hidayat, A., & S. H. K. P. (2022). Studi Efisiensi *Incinerator* untuk Pengolahan Limbah Padat. *Jurnal Riset Teknologi dan Aplikasi*, 4(1), 10–18.
- Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN). (2024, Juli 26). 113 Juta Ton Sampah di Indonesia Tidak Terkelola dengan Baik. Diambil dari <https://brin.go.id/drid/posts/kabar/113-juta-ton-sampah-di-indonesia-tidak-terkelola-dengan-baik>
- Chidambaram, A. R., Krishnasamy, A., Duraisamy, G., & Hossain, A. K. (2023). Investigations on reactivity controlled compression ignition combustion with different injection strategies using alternative fuels produced from waste resources. *International Journal of Engine Research*, 24(9), 4063–4076. <https://doi.org/10.1177/14680874231179044>
- Copik, P., Szłęk, A., & Ditaranto, M. (2024). Simplified mathematical model of oxy-fuel combustion of municipal solid waste in the grate furnace: Effect of different flue gas recirculation rates and comparison with conventional mode. *Archives of Thermodynamics*, 13–25. <https://doi.org/10.24425/ather.2024.151233>
- DeMarini, D. M., & Linak, W. P. (2022). Mutagenicity and carcinogenicity of combustion emissions are impacted more by combustor technology than by fuel composition: A brief review. *Environmental and Molecular Mutagenesis*, 63(3), 135–150. <https://doi.org/10.1002/em.22475>
- Ding, Y., & Chen, X. (2025). Influence of secondary air on combustion process and pollutant emissions in a sludge fluidized bed *incinerator*. *E3S Web of Conferences*, 628, 01022. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202562801022>
- Du, H., Li, Z., Liu, Z., Zhang, M., Chen, Z., Song, J., ... Xiao, R. (2022). Influence of the parallel oil-secondary air and *F*-layer secondary air distribution on the flow, combustion, and NO_x generation characteristics of FW down-fired boilers retrofitted with a stable combustion

- technology. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 17(6), e2827. <https://doi.org/10.1002/apj.2827>
- Ellappan, S., Rajendran, S., Dhairiyasamy, R., Al-Mdallal, Q. M., Khan, S. A., Asif, M., ... Ağbulut, Ü. (2024). Experimental investigation of ternary blends on performance, and emission behaviors of a modified low-heat rejection CI engine. *Case Studies in Thermal Engineering*, 60, 104673. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104673>
- Endah Agustina, S., A.Pane, E., F.Nurcholis, M., & Arviansyah. (2022). Design Development of Portable (Mini) Multi-function *Incinerator* for Dry Medical Waste Handling. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1038(1), 012057. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1038/1/012057>
- García Sánchez, G. F., Chacón Velasco, J. L., & Fuentes Díaz, D. A. (2024). Numerical investigation of combustion in a panela furnace using openfoam. *Ingeniería y Competitividad*, 26(1). <https://doi.org/10.25100/iyc.v26i1.13410>
- Herrapstanti, E. H., Saputra, Y. M. S., Suryanto, H., & Ashraf, M. A. (2023). Portable *Incinerator* Capacity of 5000 Grams with Used Fuel Oil. *Advance Sustainable Science, Engineering and Technology*, 6(1), 0240103. <https://doi.org/10.26877/asset.v6i1.17108>
- Himayasari, D. (2021). Analisis Implementasi 3R pada Pengelolaan Sampah. *Jurnal Analisis dan Pengelolaan Lingkungan*, 5(2), 110–118.
- Idris, M., Setyawan, M., & Suharto, T. E. (2025). Analysis of the Effect of Air Flow Rate and Waste Cooking Oil on Furnace Efficiency. *Eksergi*, 22(1), 25–32. <https://doi.org/10.31315/7jkgte77>
- Jamaluddin. (2022). Dampak Asap Pembakaran Sampah terhadap Kesehatan. *Jurnal Kesehatan Lingkungan*, 3(1), 40–45.
- Liu, X., Zhu, G., Asim, T., & Mishra, R. (2024). Design of a Novel α -Shaped Flue Gas Route Flame *Incinerator* for the Treatment of Municipal Waste Materials. *Waste and Biomass Valorization*, 15(4), 2483–2498. <https://doi.org/10.1007/s12649-023-02291-5>
- Lutfi, M. (2021). Pemanfaatan Limbah Oli Bekas Sebagai Bahan Bakar Alternatif. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 7(1), 30–38.
- Mahyudin, S. (2025). *Wawancara Pribadi Kepala DLH Kota Cilegon*.
- Maithomklang, S., Sukjit, E., Srisertpol, J., Klinkaew, N., & Wathakit, K. (2023). Pyrolysis Oil Derived from Plastic Bottle Caps: Characterization of Combustion and Emissions in a Diesel Engine. *Energies*, 16(5), 2492. <https://doi.org/10.3390/en16052492>
- Makworo, D., Kiplimo, R., Hawi, M., & Owiti, B. (2022). Optimization of Flow Parameters for Waste Lubricating Oil Combustion. *World Journal of Engineering and Technology*, 10(04), 875–894. <https://doi.org/10.4236/wjet.2022.104056>
- Nurhayati. (2020). Pengurangan Sampah dengan 3R. *Jurnal Pengabdian Masyarakat*, 1(2), 50–55.
- Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 101 Tahun 2014 tentang Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun*. , (2014).
- Sahbudin, M., Hermawan, W., & Sutejo, A. (2024). Optimization of used engine oil Furnace Design with Initial Heater. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung (Journal of Agricultural Engineering)*, 13(4), 1237. <https://doi.org/10.23960/jtep-l.v13i4.1237-1248>
- Syafrudin, R. & Ratman. (2020). Pengelolaan Limbah B3 dengan *Incinerator*. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 2(1), 20–25.
- Valea, A. R. A. A., Compaoré, H., Zoundi, O., & Nzihou, J. F. (2024). Experimentation of Grate Combustion of Municipal Solid Waste in Ouagadougou: Influence of Primary and Secondary Air Flow on Thermal Potential. *Asian Journal of Physical and Chemical Sciences*, 12(4), 1–11. <https://doi.org/10.9734/ajopacs/2024/v12i4231>

- Yulianto, M., Hartulistiyoso, E., Nelwan, L. O., Agustina, S. E., & Gupta, C. (2023). Thermal Characteristics of Coconut Shells as Boiler Fuel. *International Journal of Renewable Energy Development*, 12(2), 227–234. <https://doi.org/10.14710/ijred.2023.48349>
- Yuvenda, D., Sudarmanta, B., Jamaludin, J., Muraza, O., Putra, R. P., Lapisa, R., ... Primandari, S. R. P. (2022). Combustion and Emission Characteristics of CNG-Diesel Dual Fuel Engine with Variation of Air Fuel Ratio. *Automotive Experiences*, 5(3), 507–527. <https://doi.org/10.31603/ae.7807>
- Zhang, L., Yang, F., Xu, L., Zhang, S., & Ren, X. (2025). Numerical Simulation and Structural Optimization of Combustion Processes in a 750 t/d Waste Incinerator. *Energies*, 18(2), 384. <https://doi.org/10.3390/en18020384>