

Pengembangan Insinerator Sampah Skala Kecil dengan Mekanisme Blower dan Sistem Kontrol Otomatis Berbasis Arduino Uno

Tika Kristianti¹, Gurruh Dwi Septano², Sayid Bahri Sriwijaya³, Julianto⁴, Riyan Dwi Saputro⁵
^{1,2,3,4,5} Politeknik PGRI Banten

Corresponding Author: Tika Kristianti, e-mail: tika@politeknikpgribanten.ac.id

Published: January , 2024

ABSTRAK

Peningkatan volume limbah padat domestik dan non-organik telah menjadi tantangan lingkungan yang serius yang memerlukan solusi pengelolaan yang efektif, efisien, dan berkelanjutan. Metode pengelolaan limbah konvensional seringkali tidak memadai dan menimbulkan risiko terhadap kualitas lingkungan dan kesehatan masyarakat.

Tujuan penelitian ini adalah untuk merancang, memproduksi, dan mengevaluasi kinerja *incinerator* berkapasitas 20 kg untuk aplikasi pengelolaan limbah skala kecil. *Incinerator* ini dikembangkan sebagai solusi alternatif untuk mengurangi volume limbah melalui proses pembakaran terkendali sambil menjaga keamanan operasional dan efisiensi energi.

Bahan dan Metode. Penelitian ini merupakan penelitian pengembangan (*Research and Development/R&D*) yang dipadukan dengan penelitian eksperimental menggunakan pendekatan *mixed methods*. Pendekatan kuantitatif digunakan untuk menganalisis kinerja mesin insinerator berdasarkan parameter suhu ruang bakar, durasi pembakaran, dan reduksi massa sampah. Pendekatan kualitatif digunakan untuk mendeskripsikan proses perancangan dan fabrikasi prototipe, karakteristik pembakaran, serta kendala teknis selama pengujian. Pengujian eksperimental dilakukan dengan parameter terkontrol, meliputi variasi jenis sampah dan pengaturan kecepatan blower berbasis Arduino Uno.

Hasil. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa *incinerator* mampu mencapai suhu pembakaran di atas 700°C dalam waktu operasional yang singkat. Sistem ini berhasil mengurangi volume limbah lebih dari 90% dengan sisa abu minimal. Penerapan sistem kontrol otomatis meningkatkan efisiensi energi, meningkatkan keamanan operasional, dan meminimalkan risiko kesalahan operasional.

Kesimpulan. Incinerator yang dikembangkan menunjukkan kinerja yang andal, konstruksi yang sederhana, dan produksi yang efisien secara biaya. Oleh karena itu, *incinerator* ini memiliki potensi yang besar untuk diterapkan sebagai solusi pengelolaan limbah yang ramah lingkungan dan praktis bagi rumah tangga, sekolah, dan industri skala kecil.

Kata kunci: Arduino Uno, *automatic control system*, *incinerator*, *solid waste management*, *waste reduction*

© 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

Permasalahan pengelolaan sampah padat di Indonesia semakin kompleks seiring dengan pertumbuhan penduduk, urbanisasi, dan peningkatan aktivitas rumah tangga (Mahajan 2023; Ramadan dan Sembiring 2023). Menurut data SIPSN KLHK pada tahun 2025, timbulan sampah nasional sebesar sekitar 23,95 juta ton per tahun dengan sekitar 65,45% belum terkelola, sehingga menunjukkan bahwa pengelolaan sampah di Indonesia masih jauh dari optimal (SIPSN 2025). Kondisi ini berpotensi menimbulkan pencemaran lingkungan, gangguan kesehatan masyarakat, serta penurunan kualitas tanah, air, dan udara (Alyaseri 2021; Mahajan 2023). Pada tingkat rumah tangga dan lingkungan kecil, pengelolaan sampah masih didominasi metode konvensional seperti open dumping dan open burning (Mahajan 2023). Praktik tersebut menghasilkan emisi berbahaya, partikel halus, serta senyawa toksik yang berdampak langsung pada kesehatan manusia (Alyaseri 2021; Daffi, Chaimang, dan Alfa 2020). Di beberapa wilayah perkotaan, termasuk Kota Serang, keberadaan titik sampah liar masih menjadi persoalan lingkungan yang signifikan. Oleh karena itu, dibutuhkan teknologi pengolahan sampah skala kecil yang efektif, aman, dan berkelanjutan.

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa teknologi insinerator merupakan salah satu metode efektif dalam mereduksi volume sampah melalui proses pembakaran bersuhu tinggi. Rahman et al. melaporkan bahwa optimalisasi desain ruang bakar dan sistem suplai udara mampu meningkatkan efisiensi pembakaran hingga mencapai reduksi volume sampah sebesar 90% (Rahman, Hossain, dan Islam 2021). Kim dan Lee menekankan pentingnya pemilihan material dan ketebalan isolasi termal terhadap kestabilan suhu operasional dan efisiensi pembakaran pada insinerator portabel (Kim dan Lee 2020). Sementara itu, Singh dan Gupta mengembangkan desain insinerator modular berkapasitas menengah yang mudah dioperasikan serta fleksibel terhadap variasi bahan bakar pendukung (Singh dan Gupta 2019). Temuan-temuan tersebut menegaskan bahwa desain mekanik dan distribusi udara merupakan faktor kunci dalam meningkatkan kinerja insinerator skala kecil.

Selain itu, perkembangan teknologi otomasi, sistem kontrol berbasis mikrokontroler mulai banyak diterapkan pada proses pembakaran dan sistem termal. Chen et al. mengembangkan sistem kontrol suhu presisi berbasis Arduino Uno dengan sensor *thermocouple* dan algoritma PID yang mampu menjaga suhu dalam rentang toleransi sempit (Chen, Wang, dan Zhang 2022). Penelitian lain oleh Wulandari dan Prasetyo menunjukkan bahwa integrasi Arduino Uno dengan pengaturan kecepatan blower mampu meningkatkan efisiensi proses termal secara signifikan (Wulandari dan Prasetyo 2021). Selain itu, Ali dan Khan membuktikan bahwa sistem monitoring dan kontrol berbasis ATmega mampu meningkatkan keandalan dan keselamatan operasional reaktor skala kecil melalui pemantauan parameter secara *real-time* (Ali dan Khan 2020). Hasil-hasil penelitian ini menunjukkan bahwa mikrokontroler memiliki potensi besar dalam meningkatkan stabilitas dan efisiensi sistem pembakaran.

Beberapa penelitian mulai mengombinasikan teknologi insinerator dengan sistem kontrol otomatis berbasis Arduino. Pramono dan Wijaya melaporkan keberhasilan pengembangan insinerator otomatis berkapasitas kecil dengan pengaturan laju udara berbasis sensor gas untuk menekan emisi karbon monoksida (Pramono dan Wijaya 2023). Suryanto et al. menemukan bahwa pengaturan kecepatan blower berbasis Arduino Uno mampu mempercepat proses pembakaran hingga 30% dan mengurangi sisa abu pembakaran (Suryanto, Nugroho, dan Santoso 2022). Abdullah dan Hidayat juga mengembangkan sistem kontrol cerdas yang secara otomatis menyesuaikan bukaan damper berdasarkan suhu ruang bakar untuk menjaga efisiensi pembakaran dan keselamatan operasional (Abdullah dan Hidayat 2021). Meskipun demikian, sebagian besar penelitian tersebut masih berfokus pada kapasitas kecil, skala laboratorium, atau konteks non-rumah tangga.

Meskipun kajian mengenai insinerator, mekanisme blower, dan sistem kontrol berbasis Arduino telah banyak dilakukan, penerapannya secara terintegrasi pada skala rumah tangga masih relatif terbatas (Bruno Eduardo Piske dkk. 2023). Banyak insinerator skala kecil masih mengandalkan pengaturan aliran udara secara manual yang berpotensi menyebabkan pembakaran tidak sempurna (Mokhtar dkk. 2025). Penelitian sebelumnya cenderung mengkaji mekanisme blower dan sistem kontrol suhu secara terpisah, bukan sebagai satu sistem terpadu (Bruno Eduardo Piske dkk. 2023; Khuriati 2022). Selain itu, masih sedikit kajian yang secara khusus merancang insinerator sesuai dengan kapasitas timbunan sampah rumah tangga (Butt dkk. 2021; Sarbatly dan Sariau 2021). Evaluasi kinerja alat dalam kondisi operasional nyata, seperti variasi jenis sampah rumah tangga, juga masih jarang dilakukan (Mokhtar dkk. 2025). Kurangnya penelitian terapan yang mengombinasikan aspek desain mekanik, otomasi, dan uji kinerja menjadi celah penelitian yang penting (Fialko dkk. 2024). Celah ini menunjukkan perlunya penelitian yang lebih komprehensif dan aplikatif.

Urgensi penelitian ini didorong oleh meningkatnya akumulasi sampah rumah tangga serta keterbatasan teknologi pengolahan sampah skala kecil yang efektif dan mudah diterapkan di masyarakat. Rata-rata produksi sampah rumah tangga di Indonesia berkisar antara 0,7 hingga 1 kg per orang per hari, sehingga pada satu rumah tangga yang terdiri dari 4-5 orang dapat dihasilkan sekitar 3-5 kg sampah per hari. Dalam kurun waktu 4-7 hari, jumlah sampah rumah tangga tersebut dapat mencapai 20 kg. Kondisi ini menunjukkan bahwa diperlukan sistem pengolahan sampah yang praktis dan efisien untuk digunakan secara berkala pada skala rumah tangga maupun kelompok rumah tangga dalam satu lingkungan. Insinerator konvensional umumnya masih memiliki kelemahan berupa konsumsi energi yang relatif tinggi serta proses pembakaran yang kurang merata akibat pengaturan

suplai udara yang belum optimal. Oleh karena itu, diperlukan inovasi teknologi pengolahan sampah skala kecil yang lebih efisien dan terkendali.

Penelitian ini mengusulkan pengembangan insinerator skala rumah tangga berkapasitas 20 kg yang dilengkapi mekanisme blower dan sistem kontrol otomatis berbasis Arduino Uno. Kebaruan penelitian terletak pada integrasi pengaturan suplai udara dan suhu pembakaran secara adaptif dalam satu sistem kompak. Integrasi tersebut diharapkan mampu meningkatkan kestabilan pembakaran, efisiensi energi, serta keselamatan operasional. Pendekatan ini merepresentasikan penerapan teknologi tepat guna yang selaras dengan prinsip keberlanjutan dan peraturan perundang-undangan di bidang pengelolaan limbah.

Penelitian ini bertujuan untuk memfabrikasi prototipe mesin insinerator berkapasitas 20 kg yang dirancang untuk pembakaran sampah padat skala kecil. Selain itu, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja pembakaran mesin insinerator yang telah difabrikasi terhadap jenis sampah kering dan sampah tertentu pada kapasitas maksimum 20 kg. Penelitian ini juga menganalisis efektivitas sistem kontrol berbasis Arduino Uno dalam mengoptimalkan parameter pembakaran, khususnya pengaturan suhu dan proses pembakaran. Melalui pengujian kinerja tersebut, penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai tingkat efisiensi dan kestabilan operasi mesin insinerator. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar pengembangan teknologi pengolahan sampah skala rumah tangga yang lebih efektif dan aman.

METODE

Jenis dan Pendekatan Penelitian

Penelitian ini dikategorikan sebagai penelitian pengembangan (*Research and development/R&D*) yang berfokus pada perancangan, fabrikasi, dan pengujian prototipe mesin insinerator skala rumah tangga (Sarbatly dan Sariau 2021). Selain itu, penelitian ini juga mencakup penelitian eksperimental, karena melibatkan pengujian kinerja mesin dengan parameter yang terkontrol, seperti jenis sampah dan pengaturan kecepatan blower berbasis Arduino Uno. Pendekatan yang digunakan adalah pendekatan campuran (*mixed methods*) (Creswell dan Clark 2021). Pendekatan kuantitatif digunakan untuk menganalisis data kinerja mesin berupa suhu ruang bakar, durasi pembakaran, serta reduksi massa sampah. Sementara itu, pendekatan kualitatif digunakan untuk mendeskripsikan proses fabrikasi, karakteristik pembakaran, serta kendala teknis yang ditemui selama pengujian.

Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di lingkungan Link Cimuncang Sidomuncul, Kelurahan Cimuncang, Kecamatan Serang, Kota Serang, Provinsi Banten. Penelitian berlangsung selama empat bulan, yaitu dari April hingga Juli 2025. Selama periode tersebut dilakukan kegiatan perancangan, pembuatan mesin insinerator berbasis kontrol Arduino, serta pengujian kinerja alat secara bertahap.

Tahapan Penelitian dan Fabrikasi

Penelitian dilakukan melalui tahapan yang sistematis, dimulai dari perancangan desain, fabrikasi mesin, integrasi sistem kontrol, hingga pengujian kinerja. Tahap perancangan meliputi penentuan konfigurasi umum mesin, khususnya desain ruang bakar yang dirancang untuk kapasitas 20 kg per siklus pembakaran. Gambar kerja detail setiap komponen utama dibuat menggunakan perangkat lunak Autodesk Inventor, mencakup struktur kabinet, ruang bakar, cerobong asap,udukan blower, dan panel kontrol. Ruang bakar dirancang berbentuk silinder dengan diameter 50 cm dan tinggi 50 cm, sehingga memiliki volume sekitar 0,098 m³ yang secara teoritis mampu menampung hingga 24,5 kg sampah rumah tangga. Tahap ini juga mencakup perancangan rangkaian elektronik untuk menghubungkan sensor suhu *thermocouple* tipe K dengan Arduino Uno serta pengaturan servo blower dan suplai oli. Seluruh desain dievaluasi berdasarkan kriteria efisiensi pembakaran, keamanan, minimisasi asap, dan kemudahan penggunaan.

Pemilihan Material

Pemilihan material dilakukan dengan mempertimbangkan ketahanan terhadap suhu tinggi, kekuatan struktural, dan ketersediaan material. Ruang bakar menggunakan drum bekas oli berbahan baja galvanis yang tahan terhadap korosi dan temperatur tinggi, serta dapat dilapisi isolasi termal untuk mengurangi kehilangan panas. Burner, kabinet luar, dan cerobong asap dibuat dari plat baja karbon dengan ketebalan yang memadai. Komponen pendukung seperti blower, pipa, baut, mur, dan

komponen elektronik dipilih sesuai spesifikasi teknis yang mendukung kinerja sistem pembakaran dan kontrol otomatis.

Instrumen Penelitian

Instrumen penelitian terdiri atas perangkat keras dan perangkat lunak (Bruno Eduardo Piske dkk. 2023). Perangkat keras meliputi sensor suhu *thermocouple* tipe K untuk mengukur suhu ruang bakar secara *real-time*, Arduino Uno sebagai pengendali utama sistem, blower untuk mengatur suplai udara pembakaran, timbangan digital untuk mengukur massa sampah dan abu residu, serta stopwatch untuk mencatat durasi pembakaran (Bruno Eduardo Piske dkk. 2023; Khuriati 2022; Trinh dkk. 2020). Perangkat lunak yang digunakan meliputi Arduino IDE untuk pemrograman sistem kontrol, Autodesk Inventor untuk perancangan gambar teknis, dan Microsoft Excel untuk pencatatan serta pengolahan data hasil pengujian (Nzihou dkk. 2024; Oh dkk. 2025; Sarbatly dan Sariau 2021).

Prosedur Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan setelah prototipe mesin insinerator selesai difabrikasi dan sistem kontrol berfungsi dengan baik. Sampel sampah yang digunakan berupa sampah organik kering dan plastik tertentu (PET dan PE) dalam kondisi kering dengan kapasitas 20 kg per siklus pembakaran. Proses pengujian dimulai dengan memasukkan sampah ke dalam ruang bakar, mengaktifkan sistem kontrol Arduino Uno, serta mencatat waktu mulai pembakaran. Suhu ruang bakar dicatat secara berkala setiap lima menit, bersamaan dengan pengamatan pembukaan servo blower dan suplai oli. Setelah pembakaran selesai, abu residu dikeluarkan dan ditimbang untuk mengetahui sisa massa pembakaran. Prosedur pengujian diulang untuk setiap jenis sampah atau variasi parameter kontrol guna memperoleh data yang representatif.

Teknik Analisis Data

Data kuantitatif dianalisis menggunakan analisis deskriptif dan komparatif (Bruno Eduardo Piske dkk. 2023). Analisis deskriptif meliputi perhitungan nilai rata-rata, standar deviasi, dan rentang data untuk setiap parameter pembakaran (Valea dkk. 2024). Analisis pengaruh kontrol Arduino dilakukan dengan mengevaluasi kestabilan suhu dan respons sistem terhadap perubahan kondisi pembakaran (Khuriati 2022). Analisis kualitatif digunakan untuk mendeskripsikan hasil observasi visual selama proses fabrikasi dan pembakaran, serta untuk mengidentifikasi tantangan operasional dan potensi pengembangan lebih lanjut (Sofi'i dkk. 2024).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Deskripsi Prototipe Mesin Insinerator dan Tampilan Fisik Mesin

Berdasarkan hasil fabrikasi, prototipe mesin insinerator kapasitas 20 kg telah berhasil dibuat yang dirancang untuk pengelolaan sampah skala rumah tangga. Secara visual, mesin memiliki dimensi keseluruhan sekitar Diameter $\times$ Tinggi = 578 mm $\times$ 2034 mm. Prototipe dirancang dengan mempertimbangkan aspek efisiensi pembakaran, kestabilan suhu, serta kemudahan pengoperasian melalui integrasi sistem mekanik dan sistem kontrol berbasis Arduino Uno.



Figure 1. Prototipe Mesin Insinerator Kapasitas 20kg

Gambar 1 memperlihatkan tampilan keseluruhan prototipe mesin insinerator yang digunakan dalam penelitian ini. Struktur utama berasal dari drum oli bekas yang dicat tahan panas. Mesin dilengkapi pintu atas untuk memasukkan sampah, pintu bawah untuk akses pengeluaran abu residu, cerobong asap vertikal di bagian atas, serta panel kontrol di bagian samping atau depan yang memuat unit Arduino Uno, sensor suhu, dan indikator operasional. Konfigurasi ini menunjukkan bahwa desain mesin telah mempertimbangkan aspek fungsionalitas, keselamatan kerja, dan kemudahan perawatan.

Spesifikasi Teknis Komponen

Spesifikasi teknis komponen pada prototipe mesin insinerator disusun untuk memastikan proses pembakaran sampah dapat berlangsung secara efektif, stabil, dan aman. Setiap komponen utama dirancang dan dipilih berdasarkan fungsinya dalam mendukung kinerja sistem pembakaran serta integrasinya dengan sistem kontrol berbasis mikrokontroler. Uraian berikut menyajikan spesifikasi teknis dari komponen utama yang digunakan pada prototipe mesin insinerator, sebagaimana ditampilkan pada masing-masing gambar.

1. Ruang Bakar (*Furnance*)



Gambar 1. Ruang Bakar (*Furnance*)

Gambar 1 menunjukkan ruang bakar (*furnace*) yang dibuat dari drum oli bekas dengan dimensi luar (*outer diameter/OD*) Ø 578 mm dan tinggi 880 mm, menggunakan pelat baja setebal 3 mm. Bagian dalam ruang bakar dilapisi *ceramic fiber blanket* tahan panas dengan ketebalan 25 mm. Ruang bakar memiliki dimensi Ø 500 mm × 500 mm dan diperkuat menggunakan besi begel berdiameter 10 mm.

2. Kompor (Burner)



Gambar 2. Kompor (Burner)

Gambar 2 menunjukkan kompor (*burner*) yang dibuat dari pelat baja karbon Q345 dengan ketebalan 2 mm. Kompor ini memiliki dimensi panjang × lebar × tinggi sebesar 40 mm × 40 mm × 40 mm. Ruang kompor dirancang untuk mencapai suhu yang lebih tinggi sehingga mendukung proses pembakaran gas volatil secara optimal.

3. Blower



Gambar 3. Blower

Gambar 3 menunjukkan blower yang digunakan untuk menyuplai aliran udara ke dalam sistem pembakaran. Blower yang digunakan merupakan tipe dengan kecepatan putar 1300 RPM, daya 35 W, dan arus 2,85 A, serta memiliki kapasitas aliran udara sebesar 300 m³/jam. Kecepatan blower dikendalikan secara variabel menggunakan modul PWM yang dihubungkan dengan Arduino Uno, sehingga laju aliran udara dapat disesuaikan dengan kebutuhan proses pembakaran.

4. Sistem Kontrol



Gambar 4. Sistem Kontrol

Gambar 4 menunjukkan sistem kontrol yang digunakan pada penelitian ini, yang berbasis mikrokontroler Arduino Uno Series R3 SMD ATmega328P. Pengukuran suhu dilakukan

menggunakan sensor termokopel tipe K yang terhubung dengan modul penguat MAX6675. Sensor termokopel dipasang pada area dinding ruang bakar dan pada saluran keluar gas untuk memantau distribusi temperatur selama proses pembakaran berlangsung.

Proses Fabrikasi Komponen

Proses fabrikasi komponen dilakukan melalui beberapa tahapan pengerjaan logam yang mengacu pada gambar teknis perancangan. Tahap awal meliputi pemotongan material menggunakan mesin potong pelat, seperti gerinda dan shear, sesuai dengan ukuran yang telah ditentukan. Selanjutnya, dilakukan proses pembentukan (*bending*) pada pelat baja untuk membentuk komponen kompor dan panel kabinet. Tahap berikutnya adalah penyambungan komponen menggunakan teknik pengelasan SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*). Kualitas hasil pengelasan diperiksa untuk memastikan kekuatan dan kerapatan sambungan, khususnya pada area ruang bakar yang bekerja pada temperatur tinggi. Tahap akhir fabrikasi adalah pemasangan lapisan isolasi berupa *ceramic fiber blanket* pada dinding ruang bakar, yang bertujuan untuk meningkatkan ketahanan termal dan mengurangi kehilangan panas selama proses pembakaran.

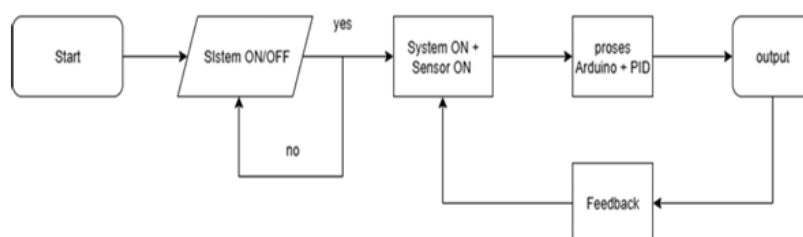
Perakitan Sistem Kontrol Arduino Uno dan Blower

Setelah seluruh komponen mekanis selesai difabrikasi, tahap selanjutnya adalah perakitan sistem kontrol melalui integrasi komponen elektronik dan mekanik. Proses ini diawali dengan pemasangan komponen elektronik, meliputi Arduino Uno, sensor suhu, modul penguat sensor, motor servo, blower, dan sistem suplai oli pada panel kontrol yang telah dirancang. Selanjutnya dilakukan pengkabelan sesuai skema rangkaian untuk menghubungkan seluruh komponen dengan sumber daya listrik. Unit blower dan tangki oli dipasang pada posisi yang telah ditentukan untuk memastikan aliran udara dan oli menuju ruang bakar berjalan optimal. Tahap akhir perakitan meliputi integrasi keseluruhan sistem dan pengujian awal guna memastikan konektivitas serta fungsionalitas setiap komponen bekerja sesuai rancangan.

Sistem insinerator dikendalikan oleh Arduino Uno R3 (ATmega328P) sebagai pusat pemrosesan dan pengendalian. Pengukuran suhu dilakukan menggunakan termokopel tipe K yang terhubung dengan modul MAX6675, sedangkan pengaturan suplai udara dan oli dikendalikan oleh motor servo. Informasi suhu dan status sistem ditampilkan melalui LCD I2C 16×2 untuk pemantauan langsung. Aspek keselamatan didukung oleh saklar *ON/OFF*, tombol *emergency shutdown*, sensor gas MQ-135, dan buzzer sebagai sistem peringatan. Sistem juga menyediakan mode operasi manual dan otomatis berbasis kendali PID, dengan kestabilan catu daya dijaga menggunakan power supply 12 V, UBEC 5 V, dan modul LM2596 agar seluruh komponen bekerja secara stabil dan aman.

Skema Rangkaian Kontrol Arduino

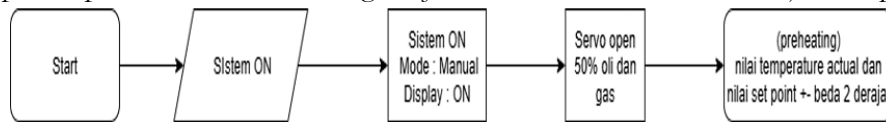
Rangkaian kontrol yang diterapkan pada prototipe insinerator ini menggunakan Arduino Uno sebagai unit pemrosesan utama. Sensor suhu *thermocouple* tipe K dihubungkan ke modul penguat MAX6675, yang berfungsi untuk mengonversi sinyal analog suhu menjadi data digital yang selanjutnya diproses oleh Arduino melalui pin digital. Data suhu yang diperoleh diolah berdasarkan algoritma kontrol yang telah diprogram, kemudian digunakan untuk mengendalikan kecepatan blower melalui modul driver motor guna menjaga kestabilan suhu pembakaran. Untuk menjelaskan alur kerja sistem kontrol secara menyeluruh, digunakan beberapa *flowchart* yang merepresentasikan mekanisme operasional sistem Arduino pada berbagai kondisi kerja. *Flowchart* kinerja sistem Arduino ditunjukkan pada Gambar 5.



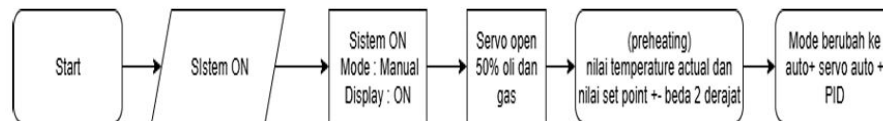
Gambar 5. *Flowchart* Kinerja Sistem Arduino

Flowchart pada Gambar 5 menggambarkan alur sistem kontrol otomatis pada insinerator berbasis Arduino, dimulai dari proses inisialisasi sistem hingga pengendalian output. Diagram ini menunjukkan logika kerja sistem sejak perangkat diaktifkan, pembacaan sensor suhu, proses

pengolahan data, hingga pengambilan keputusan untuk mengatur blower dan aktuator lainnya. Sistem ini menerapkan konsep closed-loop control dengan umpan balik berbasis PID (*Proportional-Integral-Derivative*) untuk menjaga kestabilan suhu, menyesuaikan kecepatan blower sesuai kebutuhan pembakaran, serta memastikan sistem keselamatan aktif ketika terdeteksi kondisi abnormal. Selain sistem kontrol utama, prototipe ini memiliki dua mode operasional, yaitu mode manual dan mode otomatis, yang masing-masing direpresentasikan dalam *flowchart* terpisah. *Flowchart* untuk mode manual ditampilkan pada Gambar 6, sedangkan *flowchart* mode otomatis ditunjukkan pada Gambar 7.

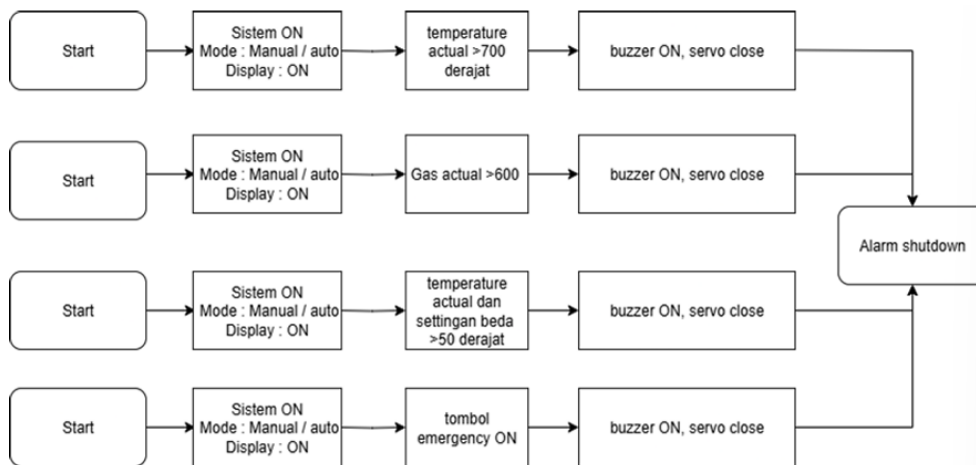


Gambar 6. *Flowchart* Mode Manual



Gambar 7. *Flowchart* Mode Auto

Berdasarkan Gambar 6 dan Gambar 7, sistem operasional dibagi menjadi dua mode kerja. Pada mode manual, sistem melakukan proses preheating awal dengan posisi servo ditetapkan secara tetap pada bukaan 30% untuk membantu pemanasan awal ruang bakar. Sementara itu, pada mode otomatis, posisi servo dikendalikan secara dinamis menggunakan algoritma PID sehingga sistem dapat mempertahankan suhu pembakaran mendekati nilai *setpoint*. Mode otomatis diaktifkan setelah suhu sistem mencapai kondisi stabil, sehingga mendukung prinsip efisiensi energi, kestabilan proses, dan keselamatan operasional. Selain mekanisme pengendalian suhu, sistem juga dilengkapi dengan fitur keselamatan berupa alarm dan *shutdown* otomatis. Alur kerja sistem keselamatan tersebut ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. *Flowchart* Alrm Shutdown dan Emergency

Flowchart pada Gambar 8 menjelaskan mekanisme proteksi darurat pada sistem insinerator otomatis berbasis Arduino. Sistem ini dirancang untuk mendeteksi berbagai kondisi berbahaya, antara lain *overtemperature*, *overgas*, selisih suhu yang tidak normal, serta aktivasi tombol *emergency*. Apabila salah satu kondisi tersebut terdeteksi, sistem akan mengaktifkan alarm dan melakukan *shutdown* otomatis guna mencegah kerusakan peralatan serta menjamin keselamatan operasional secara keseluruhan.

Uji Kinerja Pembakaran Sampah Organik Kering

Pengujian tahap pertama menggunakan sampah organik kering berupa campuran daun kering dan kertas dengan perbandingan 50:50 dan total massa sebesar 20 kg. Sampah dimasukkan ke ruang bakar, kemudian sistem kontrol berbasis Arduino diaktifkan pada mode manual dengan suhu lingkungan sekitar 30°C. Blower dinyalakan dengan pembukaan awal servo sebesar 45° sebagai tahap preheating untuk mendukung proses pengeringan dan pembakaran awal. Suhu ruang bakar dipantau secara *real-time*, sementara pembukaan servo pada jalur blower selanjutnya disesuaikan secara otomatis oleh sistem berdasarkan algoritma kontrol suhu guna mencapai dan mempertahankan suhu target pengujian. Hasil pengujian pembakaran sampah organik kering tersebut dirangkum dan disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Uji Kinerja Pembakaran Sampah Organik Kering

No	Parameter	Nilai	Keterangan
1	Jenis Sampah	Daun kering & kertas	Organik kering, perbandingan 50:50
2	Total Massa Sampah	20 kg	Campuran daun dan kertas
3	Kapasitas Insinerator	20 kg	Sesuai kapasitas maksimum
4	Lama Pembakaran	1 jam 30 menit	Waktu hingga sampah habis terbakar
5	Suhu Maksimum Pembakaran	650 °C	Tercapai saat puncak proses pembakaran
6	Sisa Abu	2,5 kg	Sisa setelah pembakaran selesai
7	Efisiensi Pembakaran	87,5 %	$(20 - 2,5) / 20 \times 100 \%$
8	Warna Asap	Abu-abu keputihan	Menandakan pembakaran cukup sempurna
9	Bau Asap	Ringan, tidak menyengat	Tidak terlalu mengganggu lingkungan sekitar
10	Catatan Khusus	Tidak ada gangguan mesin	Operasi sistem lancar dan stabil

Berdasarkan Tabel 1 hasil uji kinerja pembakaran sampah organik kering, pengujian dilakukan menggunakan campuran daun kering dan kertas dengan rasio 50:50 dan total massa 20 kg, sesuai kapasitas maksimum insinerator. Komposisi ini dipilih karena kedua material mudah terbakar dan umum dijumpai dalam limbah rumah tangga. Proses pembakaran berlangsung selama 1 jam 30 menit dengan konsumsi oli sekitar 0,9 liter, menunjukkan laju pembakaran yang relatif cepat untuk sampah organik ringan. Suhu maksimum pembakaran mencapai 650°C, berada dalam kisaran ideal untuk pembakaran limbah organik dan mendukung dekomposisi material secara menyeluruh. Sisa abu yang dihasilkan sebesar 2,5 kg, sehingga efisiensi pembakaran mencapai 87,5%, yang menunjukkan sebagian besar massa sampah berhasil dikonversi menjadi energi panas. Asap yang dihasilkan berwarna abu-abu keputihan dengan bau ringan dan tidak menyengat, mengindikasikan pembakaran berlangsung cukup sempurna. Selama pengujian, insinerator beroperasi secara stabil tanpa gangguan, menunjukkan sistem pembakaran memadai untuk menangani sampah organik pada kapasitas maksimum secara aman dan efisien.

Kinerja Pembakaran Sampah Plastik (PET dan PE)

Pengujian kedua dilakukan menggunakan sampah plastik PET dan PE dengan komposisi 70% PET dan 30% PE serta total massa 20 kg. Sampel disiapkan dalam kondisi kering, dan seluruh komponen insinerator, termasuk sistem kelistrikan, suplai oli bekas, serta program kontrol Arduino Uno, dipastikan berfungsi dengan baik. Sampah dimasukkan ke dalam ruang bakar, kemudian sistem kontrol Arduino diaktifkan untuk mengoperasikan blower dan memantau suhu ruang bakar secara *real-time*, dengan pencatatan suhu setiap 5 menit. Hasil pengujian menunjukkan waktu pembakaran selama 1 jam 50 menit dengan suhu maksimum 700°C dan sisa residu 1,2 kg, sehingga efisiensi pembakaran mencapai 94%. Meskipun efisiensi massa tinggi, asap yang dihasilkan berwarna abu-abu pekat hingga kehitaman dengan bau menyengat, yang mengindikasikan potensi pembakaran tidak sempurna serta pembentukan senyawa toksik. Fluktuasi suhu yang lebih besar akibat perubahan fasa plastik menunjukkan bahwa pembakaran plastik memerlukan pengendalian suhu dan emisi yang lebih ketat dibandingkan sampah organik, sebagaimana dirangkum pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Uji Kinerja Pembakaran Sampah Plastik (PET dan PE)

No	Parameter	Nilai	Keterangan
1	Jenis Sampah	Plastik PET & PE	PET dari botol minum, PE dari kantong/kemasan plastik
2	Komposisi Sampah	70% PET & 30% PE	Rasio berdasarkan berat
3	Total Massa Sampah	20 kg	Sesuai kapasitas maksimum
4	Kapasitas Insinerator	20 kg	Sama seperti uji sampah organik
5	Lama Pembakaran	1 jam 50 menit	Lebih lama dari uji organik karena laju leleh dan gasifikasi plastik
6	Suhu Maksimum Pembakaran	700 °C	Lebih tinggi karena plastik meleleh terlebih dahulu sebelum terbakar
7	Sisa Abu atau Residu	1,2 kg	Sisa hasil pembakaran plastik, kemungkinan material tidak terbakar penuh
8	Efisiensi Pembakaran	94 %	$(20 - 1,2) / 20 \times 100 \%$

9	Warna Asap	Abu-abu pekat, kadang kehitaman	Indikasi pembentukan senyawa toksik
10	Bau Asap	Menyengat khas plastik terbakar	Diperlukan filtrasi dan kontrol emisi tambahan
11	Performa Sistem Kontrol Arduino	Perlu penyesuaian Terjadi pelelehan penumpukan plastik	Deteksi suhu dan laju emisi lebih fluktuatif, membutuhkan kalibrasi ulang
12	Catatan Khusus		Membutuhkan waktu pemanasan awal lebih lama dan kontrol suhu lebih stabil

Berdasarkan Tabel 2 hasil uji kinerja pembakaran sampah plastik (PET dan PE), pengujian dilakukan menggunakan campuran 70% PET dan 30% PE dengan total massa 20 kg. Perbedaan karakteristik termal dan titik leleh menyebabkan proses pembakaran diawali oleh tahap pelelehan, sehingga memerlukan energi lebih besar dibandingkan sampah organik. Waktu pembakaran mencapai 1 jam 50 menit dengan konsumsi oli bekas 1,21 liter dan suhu maksimum 700°C, yang mencerminkan intensitas termal yang tinggi. Efisiensi pembakaran sebesar 94% diperoleh dari massa residu 1,2 kg. Meskipun efisiensinya tinggi, asap yang dihasilkan berwarna abu-abu pekat hingga kehitaman dengan bau menyengat, yang mengindikasikan pembakaran tidak sempurna (*incomplete combustion*) dan potensi pembentukan senyawa berbahaya seperti dioksin, furan, dan PAH.

Dari sisi sistem kontrol, pembakaran plastik menunjukkan fluktuasi suhu yang lebih ekstrem akibat perubahan fasa material. Kondisi ini menuntut kontrol yang lebih adaptif melalui penambahan sensor suhu multi-titik, integrasi sensor gas (CO, CO₂, dan VOC), serta pengaturan ventilasi otomatis. Ditinjau dari aspek keselamatan dan lingkungan, pembakaran sampah plastik memiliki risiko yang lebih tinggi dibandingkan sampah organik. Oleh karena itu, implementasi pembakaran plastik disarankan dilakukan pada sistem tertutup yang dilengkapi filtrasi asap, penetral gas berbahaya, dan prosedur keselamatan yang ketat.

Kinerja Pembakaran Sampah Campuran

Pengujian pembakaran campuran sampah dilakukan menggunakan kombinasi 50% sampah organik (daun kering dan kertas) dan 50% sampah plastik (PET dan PE) dengan total massa 20 kg. Seluruh komponen insinerator, termasuk sistem kelistrikan, suplai bahan bakar oli bekas, dan program kontrol berbasis Arduino Uno, dipastikan berfungsi dengan baik sebelum pengujian. Sampah yang telah ditimbang dicampur secara merata dan dimasukkan ke dalam ruang bakar, kemudian sistem kontrol Arduino diaktifkan untuk mengoperasikan blower dan memantau suhu pembakaran secara *real-time*. Selama proses berlangsung, dicatat waktu pembakaran, suhu maksimum, karakteristik asap, serta respons sistem kontrol. Setelah pembakaran selesai dan kondisi sistem aman, abu residu dikeluarkan dan ditimbang untuk menentukan massa sisa pembakaran. Hasil pengujian pembakaran sampah campuran tersebut dirangkum dan disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Uji Kinerja Pembakaran Sampah Campuran

No	Parameter	Nilai	Keterangan
1	Komposisi Sampah	50% organik (daun kering & kertas), 50% plastik (PET & PE)	Berdasarkan berat total 20 kg
2	Total Massa Sampah	20 kg	Dicampur dan dimasukkan sekaligus
3	Lama Pembakaran	1 jam 45 menit	Lebih lama dari uji organik dan lebih cepat dari uji plastik
4	Suhu Maksimum Pembakaran	700 °C	Kombinasi sifat mudah terbakar organik dan suhu tinggi plastik
5	Massa Sisa Pembakaran	1,8 kg	Abu dan sisa plastik yang tidak terbakar sempurna
6	Efisiensi Pembakaran	91 %	$(20 - 1,8) / 20 \times 100 \%$
7	Warna Asap	Abu-abu pekat	Indikasi sebagian pembakaran tidak sempurna
8	Bau Asap	Menyengat, campuran asap organik dan plastik	Diperlukan ventilasi dan filter tambahan
9	Suhu Mulai Terbakar	±300 °C	Awal nyala api terpantau
10	Titik Suhu Stabil	550–650 °C	Suhu kerja stabil saat pembakaran aktif
11	Performa Sistem Kontrol Arduino	Normal, namun fluktuatif suhu perlu kompensasi logika	Sistem membaca suhu dengan delay kecil

Berdasarkan tabel 3 hasil uji kinerja pembakaran sampah campuran yang disajikan, pengujian pembakaran campuran sampah dilakukan dengan rasio 50% sampah organik (daun kering dan kertas) dan 50% sampah plastik (PET dan PE). Perbedaan sifat termal kedua material menyebabkan proses pembakaran berlangsung dalam dua fase utama, yaitu pembakaran cepat pada sampah organik dan pembakaran lambat akibat proses pelelehan plastik yang memiliki nilai kalor lebih tinggi. Hasil pengujian menunjukkan waktu pembakaran sekitar 1 jam 45 menit dengan konsumsi oli bekas sebesar 1,155 liter, berada di antara pembakaran sampah organik dan plastik murni. Suhu maksimum yang tercapai sekitar 700°C, cukup untuk mendukung pembakaran efektif, namun memerlukan pengendalian suhu yang baik guna mencegah kerusakan komponen dan risiko pelepasan gas berbahaya.

Efisiensi pembakaran yang diperoleh sebesar 91%, berdasarkan massa awal 20 kg dan residu 1,8 kg. Nilai ini lebih tinggi dibandingkan pembakaran sampah organik murni, namun sedikit lebih rendah dibandingkan plastik murni, dipengaruhi oleh residu abu dari sampah organik dan kecenderungan plastik terurai menjadi gas atau meleleh. Dari sisi emisi, asap berwarna abu-abu pekat dengan bau menyengat mengindikasikan pembakaran yang belum sepenuhnya sempurna serta potensi terbentuknya senyawa berbahaya, seperti dioksin, furan, karbon monoksida, dan partikulat halus. Oleh karena itu, pembakaran campuran sampah memerlukan sistem pengendalian emisi dan pengaturan suhu yang lebih optimal untuk menjamin keselamatan dan keberlanjutan lingkungan.

Uji Kinerja Kontrol Arduino Terhadap Proses Pembakaran

Pengujian kinerja sistem kontrol Arduino dilakukan melalui dua tahap, yaitu pemanasan awal (mode manual) dan pengendalian otomatis (mode auto). Pada tahap pemanasan awal, blower diaktifkan dengan sudut servo 45°, sehingga suhu ruang bakar meningkat dari sekitar 30°C hingga 400°C dalam 25 menit, dan pada menit ke-30 sistem siap beralih ke mode otomatis. Mode otomatis diaktifkan pada menit ke-31 dengan *setpoint* awal 445°C, di mana kontrol berbasis PID menstabilkan suhu melalui penyesuaian sudut servo menjadi sekitar 40°. Selanjutnya, *setpoint* dinaikkan secara bertahap hingga 450°C, 455°C, dan 460°C sambil diamati respons servo dan blower. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem kontrol PID mampu menjaga kestabilan suhu secara adaptif pada setiap perubahan *setpoint*. Pada menit ke-55, *setpoint* dinaikkan menjadi 465°C dan suhu berhasil distabilkan, yang menunjukkan kinerja sistem kontrol Arduino yang stabil dan responsif. Hasil pengujian kontrol Arduino terhadap proses pembakaran tersebut dirangkum dan disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Uji Kinerja Kontrol Arduino Terhadap Proses Pembakaran

Waktu (menit)	Suhu Aktual (°C)	<i>Setpoint</i> (°C)	Mode	Keterangan	Sudut Servo (°)	Status Blower	Catatan
0	30	–	Manual	Start preheating	45	ON	Preheating
5	120	–	Manual	Preheating	45	ON	Pemanasan cepat
10	210	–	Manual	Preheating	45	ON	Suhu naik stabil
15	280	–	Manual	Preheating	45	ON	Suhu naik stabil
20	350	–	Manual	Preheating	45	ON	Suhu naik stabil
25	400	–	Manual	Preheating	45	ON	Stabilisasi
30	443	–	Manual	Siap switch auto	45	ON	Mendekati <i>setpoint</i>
31	444	445	Auto	Mode auto ON, <i>setpoint</i> pertama	45	ON	Transisi awal ke PID
35	445	445	Auto	Stabilisasi PID	40	ON	<i>Setpoint</i> tercapai
40	448	450	Auto	<i>Setpoint</i> naik +5 °C	38	ON	PID opsional
45	452	455	Auto	<i>Setpoint</i> naik +5 °C	36	ON	Stabil
50	460	460	Auto	Stabilisasi PID	35	ON	Stabil
55	465	465	Auto	<i>Setpoint</i> naik +5 °C	35	ON	<i>Setpoint</i> tercapai

Berdasarkan Tabel 4 hasil uji stabilitas suhu, penerapan sistem kontrol berbasis Arduino menunjukkan keunggulan dalam menjaga kestabilan suhu ruang bakar. Sistem ini memantau suhu secara *real-time* menggunakan sensor *thermocouple* tipe K dan mengatur pembukaan servo blower serta suplai oli secara otomatis berdasarkan ambang suhu yang diprogram. Dengan mekanisme tersebut, fluktuasi suhu dapat dikendalikan secara optimal, terutama saat terjadi perubahan beban sampah dari

organik ke plastik yang memerlukan suhu lebih tinggi. Penerapan kontrol otomatis menghasilkan pembakaran yang lebih efisien melalui pengaturan suplai udara dan bahan bakar yang presisi, sehingga residu berkurang dan efisiensi pembakaran mencapai sekitar 91%. Selain itu, sistem Arduino menunjukkan responsivitas yang baik terhadap dinamika pembakaran campuran organik dan plastik. Fluktuasi suhu akibat perubahan fasa plastik dan pembakaran cepat material organik dapat diatasi melalui pengaturan servo blower secara adaptif, sehingga kestabilan proses tetap terjaga. Dari sisi keselamatan dan otomasi, penggunaan Arduino mengurangi ketergantungan pada pengaturan manual dan menekan risiko kesalahan operator. Sistem ini juga berpotensi dikembangkan menjadi fully automated melalui integrasi perangkat tambahan untuk meningkatkan keselamatan operasional saat suhu mendekati batas aman.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil fabrikasi dan pengujian, prototipe mesin insinerator skala rumah tangga berkapasitas 20 kg telah berhasil direalisasikan sesuai dengan rancangan teknis. Mesin ini menggunakan drum bekas oli berlapis isolasi keramik fiber dengan ruang bakar silinder berdiameter dan tinggi 50 cm, serta dikendalikan oleh Arduino Uno untuk mengatur kecepatan blower dan suplai oli berdasarkan pembacaan suhu secara *real-time*. Sistem kontrol tersebut mampu menjaga suhu ruang bakar pada kisaran 650°C–700°C, sehingga proses pembakaran berlangsung stabil dan efisien. Hasil pengujian menunjukkan efisiensi pembakaran sebesar 87,5% untuk sampah organik kering, 94% untuk sampah plastik (PET dan PE), dan 91% untuk sampah campuran, dengan rata-rata reduksi massa mencapai 90,83%. Durasi pembakaran relatif singkat, yaitu 1 jam 30 menit untuk sampah organik, 1 jam 45 menit untuk sampah campuran, dan 1 jam 50 menit untuk sampah plastik, yang menunjukkan efektivitas sistem kontrol dan blower. Variasi karakteristik asap dan residu dipengaruhi oleh jenis sampah, di mana plastik menghasilkan asap lebih pekat dan bau menyengat dibandingkan sampah organik.

Meskipun kinerja insinerator menunjukkan hasil yang baik, pengembangan lebih lanjut masih diperlukan untuk meningkatkan aspek lingkungan dan keselamatan. Pengujian lanjutan disarankan untuk mengukur emisi gas buang secara kuantitatif serta mengevaluasi efisiensi termal dan kestabilan suhu jangka panjang. Peningkatan kapasitas mesin juga perlu dikaji agar dapat diterapkan pada skala komunal atau industri kecil. Sistem kontrol Arduino dapat dikembangkan melalui penambahan sensor suhu multi-titik dan sensor gas untuk pemantauan pembakaran secara *real-time*. Selain itu, penggunaan material yang lebih tahan panas dan korosi pada ruang bakar disarankan untuk memperpanjang umur pakai mesin. Penyusunan dokumentasi operasional yang lebih rinci serta sosialisasi kepada masyarakat juga penting untuk mendukung pemanfaatan insinerator secara optimal sebagai solusi alternatif pengelolaan sampah rumah tangga yang lebih efektif dan terkendali.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, F., dan R. Hidayat. 2021. "Sistem Kontrol Cerdas untuk Mesin *Incinerator* Skala Kecil Menggunakan Arduino Mega." *Jurnal Teknologi Lingkungan* 22(3):280–88.
- Ali, M., dan S. Khan. 2020. "Real-time Monitoring and Control System for Small Chemical Reactors Using ATmega328P Microcontroller." *International Journal of Advanced Computer Science and Applications* 11(7):300–307. doi:10.14569/ijacsa.2020.0110738.
- Alyaseri, Isam. 2021. "Estimating Environmental Damages Due to Solid Wastes' Open Burning Using Endpoint Approach in Life Cycle Assessment." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 1090(1):012088. doi:10.1088/1757-899X/1090/1/012088.
- Bruno Eduardo Piske, Fernanda Lopes, Jonathan Utzig, dan Vinicyus Rodolfo Wiggers. 2023. "Small-scale Waste Heat Recovery through incineration – a brief review." *RE&PQJ* 21(2). doi:10.24084/repqj21.255.
- Butt, Osama Majeed, Muhammad Shakeel Ahmad, Hang Seng Che, dan Nasrudin Abd Rahim. 2021. "Design of a small scale fluidized-bed *incinerator* for MSW with ability to utilize HHO as auxiliary fuel." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 1127(1):012040. doi:10.1088/1757-899X/1127/1/012040.

- Chen, L., Q. Wang, dan Y. Zhang. 2022. "A High-Precision Arduino-Based Temperature Control System for Industrial Heating Furnaces." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 69(5):4500–4509. doi:10.1109/TIE.2021.3132111.
- Creswell, John W., dan Vicki L. Plano Clark. 2021. "Designing and Conducting *Mixed methods Research*." <https://us.sagepub.com/en-us/nam/designing-and-conducting-mixed-methods-research/book241842>.
- Daffi, R. E., A. N. Chaimang, dan M. I. Alfa. 2020. "Environmental Impact of Open Burning of Municipal Solid Wastes Dumps in Parts of Jos Metropolis, Nigeria." *Journal of Engineering Research and Reports* 30–43. doi:10.9734/jerr/2020/v12i317083.
- Fialko, N. M., R. O. Navrodska, S. I. Shevchuk, G. O. Gnedash, dan O. V. Martiuk. 2024. "Improving The Plants Efficiency of Thermal Incineration Household Waste by Recovering Waste Heat." *Thermophysics and Thermal Power Engineering* 46(2):92–99. doi:10.31472/ttpe.2.2024.10.
- Khuriati, Ainie. 2022. "FOPDT Model Based on Experimental Data from Municipal Solid Waste Incineration Process Temperature Control in Fixed Bed." *Journal of Physics and Its Applications* 4(2):33–36. doi:10.14710/jpa.v4i2.12442.
- Kim, J., dan S. Lee. 2020. "Fabrication and Thermal Stability Analysis of a Portable *Incinerator* with Innovative Refractory Materials." *Journal of Environmental Engineering* 146(8):04020078.
- Mahajan, Rinnie. 2023. "Environment and Health Impact of *Solid waste management* in Developing Countries: A Review." *Current World Environment* 18(1):18–29. doi:10.12944/CWE.18.1.3.
- Mokhtar, Nur Hazwan, Nortazi Sanusi, Nur Fatihah Azmi, dan Mizah Ramli. 2025. "Comparative Study of Airflow Efficiency in Rectangular and Cylindrical Small-Scale *Incinerator* Designs." *Journal of Advances in Fluid, Heat, and Materials Engineering* 2(1):48–56. doi:10.37934/afhme.2.1.4856a.
- Nzihou, Jean Fidele, Ousmane Zoundi, Salou Hamidou, Bila Gerard Segda, dan Frederic Ouattara. 2024. "Monitoring Temperature and Humidity in Biomass Gasification Using Arduino Technology." *Current Journal of Applied Science and Technology* 43(3):62–75. doi:10.9734/cjast/2024/v43i34361.
- Oh, Alex J., Colby J. Stoddard, Craig Queenan, dan Seongshik Oh. 2025. "Efficient and Affordable Thermoelectric Measurement Setup Using Arduino and LabVIEW for Education and Research." *American Journal of Physics* 93(12):991–99. doi:10.1119/5.0289649.
- Pramono, B., dan K. Wijaya. 2023. "Fabrikasi dan Pengujian Mesin *Incinerator* Otomatis Kapasitas 5 kg Berbasis Arduino Uno untuk Minimasi Emisi CO." *Jurnal Rekayasa Sipil dan Lingkungan* 7(1):45–52.
- Rahman, M. S., M. A. Hossain, dan M. R. Islam. 2021. "Design and Performance Evaluation of a Small Scale Double Chamber *Incinerator* for Household Waste Management." *Waste Management* 120:150–58.
- Ramadan, A. H., dan E. Sembiring. 2023. "Potential of Plastic Waste Leakage to Environment in Indonesian Final Disposal." *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 1257(1):012001. doi:10.1088/1755-1315/1257/1/012001.
- Sarbatly, Rosalam, dan Jamilah Sariau. 2021. "Assessment and a Case Study of Small-Scale *Incinerators* for Municipal and Agriculture Waste Disposal in Rural Regions." Hlm. 61–76 dalam *Waste Management, Processing and Valorisation*, disunting oleh A. Z. Yaser, H. A. Tajarudin, dan A. Embrandiri. Singapore: Springer Singapore.
- Singh, A., dan R. Gupta. 2019. "Design and Performance Analysis of a Modular *Incinerator* for Rural Applications." Hlm. 235–42 dalam *Proceedings of the International Symposium on Waste Management*.
- SIPSN. 2025. "SIPSN - Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional." <https://portal-sipsn.kemenvh.go.id/>.
- Sofi'i, Yepy, Sudarman Sudarman, Roro Hendaryati, Suwarsono Suwarsono, Andinusa Rahmandhika, Rizki Hidayatulloh, Muhammad Budiman, Galuh As'adi, Ramdhan Zaroby, dan Willy Nugroho. 2024. "Small-Scale Thermoelectric *Incinerator* Prototype for Sustainable Waste Management and Power Generation." *Engineering and Technology Journal* 0(0):1–15. doi:10.30684/etj.2024.146331.1678.

- Suryanto, D., A. Nugroho, dan B. Santoso. 2022. "Pengaruh Variasi Kecepatan Blower Terhadap Laju Pembakaran pada *Incinerator* Sampah Organik Terkontrol Arduino Uno." Hlm. 180–87 dalam *Prosiding Seminar Nasional Teknik Mesin*.
- Trinh, Van Tuyen, Huu Tap Van, Quang Huy Pham, Minh Viet Trinh, dan Ha Manh Bui. 2020. "Treatment of Medical Solid Waste Using an Air Flow Controlled *Incinerator*." *Polish Journal of Chemical Technology* 22(1):29–34. doi:10.2478/pjct-2020-0005.
- Valea, Arnaud R. A. A., Hamidou Compaoré, Ousmane Zoundi, dan Jean Fidèle Nzihou. 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. doi:10.9734/ajopacs/2024/v12i4231.
- Wulandari, S., dan A. Prasetyo. 2021. "Pengembangan Sistem Kontrol Otomatis Pengering Biomassa Berbasis Arduino Uno." *Jurnal Teknik Mesin Indonesia* 16(2):112–20.