

Desain dan Implementasi Sistem Kendali Suhu pada Incinerator Skala Perumahan

Putra Anugrah Ramadhan 1st
School of Electrical engineering
Telkom University
Bandung, Indonesia
ptramadhan13@gmail.com

Uke Kurniawan Usman
School of Electrical engineering
Telkom University
Bandung, Indonesia
ukeusman@telkomuniversity.ac.id

R. Agus Ganda Permana
School of Electrical engineering
Telkom University (Afiliasi)
Bandung, Indonesia
agusgandapermana@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Pengelolaan sampah rumah tangga merupakan isu mendesak karena metode penanganan tradisional seperti pembakaran terbuka dan penimbunan sering menimbulkan dampak lingkungan serius, terutama polusi udara, pencemaran tanah, serta pelepasan gas berbahaya. Oleh karena itu, diperlukan solusi teknologi yang lebih ramah lingkungan, efisien, dan mudah diimplementasikan pada skala kecil. Penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem kendali suhu pada incinerator rumah tangga dengan metode kontrol on/off untuk menggantikan pengaturan manual yang cenderung tidak stabil. Sistem dirancang menggunakan mikrokontroler Arduino Mega sebagai pusat kendali, dengan thermocouple tipe-K sebagai sensor suhu berkapasitas tinggi yang mampu memberikan umpan balik real-time. Data hasil pembacaan sensor diolah untuk mengatur suplai gas bahan bakar melalui solenoid valve yang bekerja otomatis, sedangkan pemantik api dan relay mendukung proses penyalaan awal. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem dapat menjaga kestabilan suhu ruang bakar pada kisaran 600–730 °C dengan fluktuasi wajar, serta mencapai akurasi pembacaan setelah kalibrasi sebesar $\pm 0,42$ °C atau 99,38%. Selain itu, incinerator mampu membakar 1 kg sampah organik hingga habis menjadi abu dalam waktu sekitar 14 menit. Penelitian ini membuktikan bahwa kontrol on/off memberikan kinerja lebih stabil dan efisien dibandingkan metode manual, serta berpotensi dikembangkan lebih lanjut melalui integrasi kecerdasan buatan.

Kata Kunci: *pengolahan sampah rumah tangga, incinerator, ramah lingkungan, sensor suhu, pemantauan real-time*

I. PENDAHULUAN

Pengelolaan sampah rumah tangga merupakan permasalahan yang semakin kompleks seiring dengan meningkatnya jumlah penduduk dan aktivitas konsumsi masyarakat. Metode konvensional seperti penimbunan di TPA dan pembakaran terbuka seringkali menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan, mulai dari pencemaran udara hingga risiko kesehatan masyarakat sekitar. Salah satu solusi yang dikembangkan adalah penggunaan incinerator, yaitu alat pembakar sampah yang menggunakan tungku dengan suhu tinggi untuk mempercepat proses reduksi volume limbah. Incinerator umumnya beroperasi pada rentang suhu 400 hingga 600 °C, di mana kestabilan suhu menjadi faktor penting dalam menentukan efisiensi pembakaran sekaligus mencegah terbentuknya polutan

berbahaya seperti dioksin dan furan. Namun, pada incinerator skala rumah tangga, pengendalian suhu sering masih dilakukan secara manual sehingga berisiko menimbulkan pembakaran tidak sempurna, konsumsi energi yang tinggi, serta timbulnya asap pekat yang mengganggu lingkungan sekitar.

Berbagai penelitian sebelumnya telah menyoroti perlunya sistem kendali otomatis pada incinerator untuk menjaga kestabilan suhu dan meningkatkan efisiensi energi. Penerapan sensor suhu berbasis thermocouple yang dikombinasikan dengan mekanisme pengendalian suplai bahan bakar menggunakan solenoid valve menjadi salah satu pendekatan yang dinilai efektif. Prinsip kerja sistem ini adalah mengatur pembukaan dan penutupan aliran bahan bakar sesuai dengan kondisi suhu aktual di dalam tungku, sehingga kestabilan suhu dapat dipertahankan dengan logika kendali sederhana on/off. Inovasi ini tidak hanya meningkatkan efisiensi proses pembakaran, tetapi juga berkontribusi pada upaya pengurangan emisi gas berbahaya.

Berdasarkan kondisi tersebut, permasalahan utama yang muncul adalah bagaimana mengendalikan suhu incinerator agar pembakaran berlangsung stabil, efisien, dan berkelanjutan dalam penggunaan jangka panjang. Selain itu, penting pula untuk mengkaji sejauh mana kinerja sistem kendali suhu ini mampu menjaga kualitas pembakaran dan menekan potensi pencemaran udara pada skala perumahan.

Tujuan dari penelitian ini adalah mengimplementasikan sistem kendali suhu otomatis pada incinerator skala rumah tangga yang mampu meningkatkan efisiensi dan kualitas pembakaran. Penelitian ini juga bertujuan untuk mengevaluasi performa incinerator dalam mengelola sampah rumah tangga secara lebih ramah lingkungan serta menguji ketahanan sistem kendali suhu selama proses pembakaran dalam jangka waktu yang cukup lama. Dengan adanya penelitian ini, diharapkan dapat diperoleh kontribusi nyata terhadap pengembangan teknologi pengelolaan sampah rumah tangga yang lebih efektif, efisien, dan berwawasan lingkungan.

II. KAJIAN TEORI

A. Incinerator

Incinerator merupakan teknologi pengolahan sampah dengan metode pembakaran pada suhu tinggi yang bertujuan untuk mengurangi volume dan massa sampah secara signifikan (Utomo et al., 2024). Pada umumnya, incinerator dapat mengurangi volume sampah hingga 80–97% dan bobot sampah sekitar 70%, sehingga lebih efektif dibandingkan metode penimbunan (Abdul Jumali et al., n.d.). Teknologi ini dapat diaplikasikan untuk berbagai jenis limbah, mulai dari sampah rumah tangga, medis, hingga limbah berbahaya (Abdul Jumali et al., n.d.). Secara teknis, incinerator merupakan sebuah tungku pembakaran yang dirancang untuk mengolah limbah padat dengan cara mengkonversinya menjadi gas dan abu. Proses ini dilakukan melalui pembakaran pada suhu tinggi yang dapat mencapai 400 °C hingga 600 °C, bahkan hingga 850 °C, sehingga mampu menghancurkan patogen serta menurunkan emisi berbahaya seperti dioksin (Syukri & Jelita, n.d.). Keberhasilan incinerator dalam mengolah limbah sangat dipengaruhi oleh kestabilan suhu ruang bakar. Untuk menjaga hal tersebut, incinerator dilengkapi dengan burner yang berfungsi mencampurkan bahan bakar LPG dengan udara sehingga menghasilkan nyala api dengan suhu sesuai kebutuhan. Sistem pembakaran ini kemudian dikendalikan secara otomatis untuk mempertahankan suhu ruang bakar agar tetap berada pada rentang optimal. Dengan demikian, incinerator tidak hanya berfungsi sebagai alat pengolah limbah tetapi juga sebagai sistem teknologi yang menuntut pengendalian suhu presisi agar proses oksidasi berlangsung sempurna (Utomo et al., 2024). Prinsip kerja incinerator melibatkan proses pembakaran di dalam ruang bakar yang didukung oleh suplai bahan bakar tambahan agar suhu tetap terjaga (Utomo et al., 2024). Suhu operasi yang ideal pada incinerator rumah tangga berada pada kisaran 600–900 °C, sedangkan limbah berbahaya membutuhkan suhu lebih tinggi untuk memastikan dekomposisi senyawa beracun berlangsung sempurna. Hasil pembakaran berupa abu padat, gas buang, serta energi panas yang dapat dimanfaatkan lebih lanjut sebagai energi alternatif (Syukri & Jelita, n.d.). Kelebihan utama incinerator adalah kemampuannya mengurangi volume sampah dengan cepat, mengurangi risiko penyebaran penyakit, serta potensi menghasilkan energi panas maupun listrik dalam konsep waste-to-energy (Abdul Jumali et al., n.d.). Pada skala rumah tangga, incinerator juga dinilai lebih efisien dibandingkan pembakaran terbuka karena prosesnya lebih terkendali dan minim pencemaran. Meski demikian, incinerator memiliki tantangan dalam implementasinya. Proses pembakaran yang tidak sempurna dapat menghasilkan emisi berbahaya seperti CO₂, NO_x, dan dioksin. Permasalahan ini umumnya disebabkan oleh fluktuasi suhu dalam ruang bakar. Oleh karena itu sistem kendali suhu diperlukan untuk menjaga kondisi operasi tetap optimal.

sehingga pembakaran berlangsung efisien dan ramah lingkungan. Selain itu, residu abu hasil pembakaran dapat mengandung logam berat yang memerlukan penanganan lanjutan. Perkembangan penelitian terkini banyak menekankan pada desain sistem kendali otomatis untuk incinerator. Sistem ini memantau suhu ruang bakar secara real-time dan mengatur suplai bahan bakar atau udara pembakaran agar tercapai kondisi stabil. Dengan adanya sistem kendali ini, risiko pembakaran tidak sempurna dapat

diminimalkan, sehingga kualitas gas buang lebih terkontrol. Pada skala perumahan, pengendalian suhu menjadi krusial karena penggunaan incinerator berdekatan dengan lingkungan tempat tinggal, sehingga keamanan dan ramah lingkungan harus lebih diperhatikan. Dengan demikian, incinerator merupakan teknologi efektif dalam manajemen sampah rumah tangga, namun membutuhkan dukungan sistem kendali suhu yang presisi agar pembakaran berlangsung stabil, efisien, serta aman bagi lingkungan. Desain dan implementasi kendali suhu menjadi aspek penting untuk memastikan keberlanjutan penggunaan incinerator perumahan sekaligus mengoptimalkan pemanfaatan energi hasil pembakaran.

B. Pengendalian suhu pada Incinerator

Incinerator dirancang untuk mengurangi volume limbah melalui proses pembakaran pada suhu tinggi, sehingga selain menghasilkan abu yang lebih sedikit, juga menurunkan potensi pencemaran lingkungan. Akan tetapi, apabila suhu ruang bakar tidak dikendalikan dengan baik, proses pembakaran berisiko tidak sempurna dan menghasilkan emisi berbahaya, terutama karbon monoksida (CO) yang bersifat toksik dan berdampak buruk bagi kesehatan serta lingkungan sekitar. Oleh karena itu, rentang suhu optimal, yaitu antara 850 °C hingga 1.400 °C, harus dipertahankan agar pembakaran berlangsung secara oksidatif penuh, sehingga senyawa berbahaya dapat dihancurkan secara efektif. Tantangan utama dalam konteks incinerator skala perumahan adalah bagaimana menjaga kestabilan suhu tersebut dengan sistem kendali sederhana yang tetap efektif dan mudah diterapkan oleh masyarakat.

Dalam beberapa penelitian sebelumnya, telah ditemukan berbagai pendekatan untuk mengendalikan suhu incinerator. Studi yang dilakukan oleh Khuriati (2021) misalnya, menunjukkan bahwa penggunaan sistem pengendali dua posisi (ON/OFF controller) dengan sensor thermocouple type-K dan aktuator berupa solenoid valve dapat menjaga suhu ruang bakar pada setpoint 300–400 °C dengan respon cepat meskipun disertai osilasi di sekitar nilai setpoint. Hasil ini membuktikan bahwa sistem pengendalian sederhana tetap mampu memberikan kinerja yang dapat diterima untuk menjaga keberlangsungan proses pembakaran. Prinsip kendali ini relevan bagi incinerator rumah tangga, karena tidak membutuhkan perangkat mahal atau algoritma kendali kompleks, melainkan cukup dengan pemrosesan data suhu oleh mikrokontroler seperti Arduino Mega untuk menentukan status buka-tutup valve bahan bakar secara otomatis. Dengan cara ini, biaya implementasi dapat ditekan, namun efisiensi pembakaran tetap terjaga.

Selain pendekatan pengendalian berbasis bahan bakar fosil, penelitian Saputra (2019) memperkenalkan incinerator berbahan bakar biomassa yang memanfaatkan sumber energi lokal seperti tempurung kelapa, sekam padi, dan serbuk kayu. Hasil pengujiannya menunjukkan bahwa bahan bakar tempurung kelapa mampu menghasilkan suhu puncak hingga 705 °C dengan efisiensi penghancuran limbah mencapai 98%. Meskipun suhu ini belum sepenuhnya mencapai standar optimal untuk pembakaran oksidatif penuh, teknologi biomassa relevan untuk incinerator perumahan karena lebih ramah lingkungan, murah, serta memanfaatkan bahan bakar yang mudah diperoleh. Namun, agar kualitas pembakaran

mendekati optimal, tetap dibutuhkan sistem kendali suhu yang dapat mengatur laju udara dan bahan bakar secara tepat agar proses pembakaran berlangsung lebih stabil.

Lebih lanjut, penelitian Suryanto dkk. (2022) merancang prototipe incinerator medis dengan tambahan teknologi pengendalian polusi berupa spray air. Prototipe tersebut mampu mencapai suhu sekitar 204–270 °C dan berhasil menurunkan partikel asap berbahaya melalui sistem penyemprotan air yang menangkap polutan. Walaupun suhu yang dicapai relatif rendah dibanding standar ideal, penelitian ini menegaskan bahwa integrasi sistem kendali suhu dengan teknologi penurunan emisi sangat penting untuk menjaga kualitas lingkungan. Konsep ini dapat diadaptasi pada incinerator skala perumahan, misalnya dengan penambahan filter sederhana atau scrubber mini untuk menyaring partikulat hasil pembakaran, sehingga penggunaan incinerator tidak menimbulkan pencemaran udara di permukiman padat penduduk.

Berdasarkan uraian tersebut, dapat disimpulkan bahwa keberhasilan desain dan implementasi sistem kendali suhu pada incinerator skala perumahan sangat ditentukan oleh pemilihan teknologi yang tepat guna. Sensor thermocouple tipe-K dan pengendali ON/OFF merupakan solusi sederhana yang murah dan efektif, sementara penggunaan biomassa sebagai bahan bakar menawarkan alternatif ramah lingkungan yang layak dipertimbangkan. Integrasi dengan teknologi penurunan polusi juga semakin memperkuat keberlanjutan sistem ini, sehingga incinerator rumah tangga tidak hanya berfungsi mengurangi volume limbah, tetapi juga aman bagi kesehatan dan lingkungan. Dengan demikian, penelitian dan penerapan sistem kendali suhu incinerator skala perumahan memiliki relevansi besar sebagai solusi praktis untuk permasalahan limbah padat di tingkat masyarakat.

C. Thermocouple

Thermocouple merupakan salah satu sensor suhu yang paling luas digunakan dalam bidang industri, penelitian, maupun aplikasi sehari-hari. Prinsip kerjanya didasarkan pada efek termoelektrik (Seebeck effect), yaitu fenomena timbulnya beda potensial listrik (tegangan) ketika dua konduktor logam berbeda disatukan pada ujungnya dan mengalami perbedaan suhu. Ujung yang diletakkan pada suhu tinggi disebut hot junction, sedangkan ujung lain yang berada pada suhu acuan disebut cold junction. Besarnya tegangan termoelektrik yang dihasilkan berbanding lurus dengan perbedaan suhu pada kedua ujung sambungan, sehingga dapat digunakan untuk mengukur suhu secara langsung (Kamal & Teknologi Rekayasa Instrumentasi dan Kontrol Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Lhokseumawe, n.d.).

Secara umum, thermocouple memiliki beberapa keunggulan seperti konstruksi sederhana, respon cepat terhadap perubahan suhu, rentang pengukuran yang luas, serta kemampuan bekerja pada kondisi ekstrem. Hal inilah yang menjadikan thermocouple banyak diaplikasikan pada sistem kendali suhu otomatis, pemantauan proses industri, hingga proteksi peralatan listrik berdaya besar. Namun, thermocouple juga memiliki kelemahan, yaitu output sinyal yang relatif kecil serta rawan noise, sehingga memerlukan

rangkaian pengkondisi sinyal sebelum diolah oleh perangkat elektronik (Nurhuda et al., 2024).

Jenis-jenis thermocouple dibedakan berdasarkan material konduktor yang digunakan, masing-masing dengan rentang suhu dan sensitivitas berbeda. Misalnya, tipe B (Platinum/Rhodium) mampu bekerja hingga 1800 °C tetapi kurang sensitif di bawah 50 °C; tipe E (Chrome/Constantan) cocok untuk suhu rendah dengan rentang -270 °C hingga 790 °C; tipe J (Iron/Constantan) dapat bekerja hingga 750 °C namun tidak tahan pada suhu di atas 760 °C; sedangkan tipe K (Chromel/Alumel) merupakan yang paling populer dengan rentang -200 °C hingga 1200 °C, bersifat murah dan serbaguna. Selain itu, terdapat tipe N, R, S, dan T, masing-masing dengan karakteristik tertentu yang membuatnya sesuai untuk aplikasi spesifik (Kamal & Teknologi Rekayasa Instrumentasi dan Kontrol Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Lhokseumawe, n.d.) dalam penelitiannya thermocouple diaplikasikan pada alat penyangrai biji kakao otomatis berbasis Arduino Uno. Sensor ini digunakan sebagai umpan balik untuk menjaga kestabilan suhu pada proses penyangraian. Hasil pengujian menunjukkan tingkat akurasi yang tinggi, dengan error terkecil 0,025% pada suhu 120,38 °C dan terbesar hanya 0,075% pada suhu 100,75 °C. Akurasi ini sangat penting karena proses penyangraian kakao memerlukan suhu stabil pada kisaran 110–120 °C agar kualitas aroma dan cita rasa terbentuk optimal. Temuan ini membuktikan bahwa thermocouple tidak hanya berfungsi sebagai sensor pengukur, tetapi juga komponen integral dalam sistem kendali otomatis di bidang pangan.

Penelitian lain oleh (Nurhuda et al., 2024) merancang alat kalibrator suhu berbasis IoT menggunakan thermocouple tipe K. Sistem ini memanfaatkan mikrokontroler ESP32-S3, modul konversi MAX6675, serta integrasi aplikasi Blynk untuk pemantauan real-time melalui perangkat Android. Hasil uji menunjukkan alat memiliki rata-rata error hanya 2,2%, dengan selisih kesalahan absolut 0,4 °C, yang masih dalam batas toleransi. Studi ini menegaskan bahwa thermocouple tipe K, bila dipadukan dengan teknologi digital dan jaringan IoT, dapat menjadi sensor suhu yang handal sekaligus mudah dipantau jarak jauh.

Selanjutnya, penelitian oleh (Nurhuda et al., 2024) menggunakan thermocouple tipe K dalam perancangan alat uji relay thermal transformator tenaga berbasis Arduino Mega 2560. Sensor ini berfungsi sebagai input utama untuk mendeteksi suhu minyak transformator. Hasil pengujian memperlihatkan akurasi sangat tinggi, mencapai rata-rata 99,88%. Hal ini menunjukkan bahwa thermocouple tipe K sangat sesuai digunakan dalam sistem proteksi transformator, di mana kestabilan pengukuran suhu sangat krusial untuk mencegah kerusakan peralatan listrik berdaya besar.

Berdasarkan kajian berbagai penelitian tersebut, dapat disimpulkan bahwa thermocouple merupakan sensor suhu serbaguna dengan kemampuan pengukuran luas, keandalan tinggi, dan integrasi yang fleksibel dengan sistem kendali modern. Meskipun memiliki keterbatasan berupa output sinyal kecil dan rentan noise, kelemahan ini dapat diatasi dengan penggunaan rangkaian pengkondisi sinyal serta modul konversi digital. Dengan perkembangan teknologi

seperti mikrokontroler dan IoT, thermocouple tidak hanya digunakan sebagai sensor pengukur, tetapi juga menjadi elemen penting dalam otomatisasi, monitoring real-time, serta proteksi peralatan industry.

D. Solenoid Valve

Solenoid valve merupakan komponen aktuator yang digunakan untuk mengatur aliran fluida, baik berupa cairan maupun gas, secara otomatis dengan memanfaatkan prinsip elektromagnetik. Saat arus listrik dialirkan ke kumparan (coil), timbul medan magnet yang menarik plunger sehingga membuka katup dan memungkinkan fluida mengalir. Sebaliknya, ketika arus listrik dihentikan, plunger kembali ke posisi semula akibat gaya pegas sehingga katup menutup dan aliran fluida terhenti.

Pada sistem kendali suhu incinerator skala perumahan, solenoid valve berperan penting sebagai pengatur aliran gas menuju ruang bakar. Stabilitas suhu pembakaran sangat krusial karena incinerator harus bekerja pada temperatur tinggi dan konstan agar limbah benar-benar terbakar sempurna tanpa meninggalkan residu berbahaya. Dengan mengintegrasikan solenoid valve ke dalam rangkaian mikrokontroler, misalnya Arduino Mega, pengendalian aliran gas dapat dilakukan secara otomatis berdasarkan pembacaan sensor suhu thermocouple tipe K. Sensor ini mendeteksi perubahan temperatur di ruang bakar, kemudian data diproses oleh mikrokontroler yang memberi perintah kepada relay untuk membuka atau menutup solenoid valve sesuai kebutuhan.

Prinsip kerja ini menjadikan solenoid valve sebagai elemen kunci dalam sistem kendali suhu incinerator. Jika suhu terdeteksi menurun di bawah batas tertentu, solenoid valve akan terbuka untuk menambah suplai gas, sedangkan jika suhu terlalu tinggi, solenoid akan menutup untuk menghentikan pasokan bahan bakar. Dengan demikian, proses pembakaran dapat dipertahankan pada kisaran temperatur yang optimal.

Selain pada incinerator, penggunaan solenoid valve juga telah banyak diterapkan dalam bidang otomasi lain, misalnya pada sistem distribusi air bersih (Lubis et al., n.d.) maupun sistem kontrol kebocoran pipa berbasis Arduino (Jefrina Dian Stifvani et al., 2025). Dalam konteks water treatment, solenoid valve berfungsi mengatur distribusi air secara otomatis berdasarkan perintah dari Programmable Logic Controller (PLC). Integrasi ini meningkatkan efisiensi pengolahan air dengan mengurangi campur tangan manual.

Dari berbagai penerapan tersebut, dapat disimpulkan bahwa solenoid valve memiliki beberapa keunggulan utama, antara lain: (1) respons cepat terhadap sinyal kontrol, (2) efisiensi energi karena bekerja hanya saat dialiri arus, (3) keandalan tinggi dalam menjaga kestabilan aliran, dan (4) mendukung sistem otomasi penuh. Keunggulan-keunggulan tersebut menjadikan solenoid valve sebagai komponen vital dalam desain dan implementasi sistem kendali suhu pada incinerator skala perumahan.

Dengan dukungan sensor suhu dan mikrokontroler, solenoid valve mampu meningkatkan kinerja incinerator melalui pengendalian aliran gas yang presisi. Hal ini tidak

hanya memastikan suhu pembakaran tetap stabil, tetapi juga mendukung efisiensi energi dan keamanan operasional dalam pengelolaan limbah rumah tangga. Oleh karena itu, integrasi solenoid valve dalam sistem kendali suhu incinerator merupakan langkah strategis untuk menghasilkan sistem yang efektif, efisien, dan ramah lingkungan.

III. METODE

Prosedur penelitian dalam perancangan sistem ini dimulai dengan tahap konseptual, yaitu merumuskan desain incinerator skala kecil yang diharapkan mampu mengolah sampah rumah tangga dengan lebih efisien. Sistem dirancang menggunakan sensor suhu sebagai input utama, mikrokontroler sebagai pusat kendali, serta aktuator sebagai komponen eksekusi. Sensor suhu yang digunakan adalah thermocouple tipe-K karena memiliki rentang suhu yang luas, tahan terhadap kondisi ekstrem, serta biaya yang relatif rendah dibandingkan jenis sensor lainnya. Thermocouple ini dihubungkan dengan modul MAX6675 yang berfungsi mengubah sinyal analog dari sensor menjadi data digital yang dapat dibaca oleh mikrokontroler. Mikrokontroler yang dipilih adalah Arduino Mega 2560, karena jumlah pin yang melimpah, kompatibilitas dengan sensor, dan kemampuan pemrosesan yang cukup untuk sistem kendali sederhana. Data suhu yang diperoleh kemudian diproses dengan logika on/off, sehingga ketika suhu berada di bawah ambang batas 600°C, aktuator berupa solenoid valve akan terbuka untuk menyalurkan gas LPG ke ruang bakar. Sebaliknya, apabila suhu telah melebihi ambang batas tersebut, sistem akan memerintahkan relay untuk menutup solenoid valve agar aliran gas berhenti.

Pada tahap berikutnya, penelitian berfokus pada perancangan perangkat keras yang meliputi rangkaian komponen dalam satu panel sistem kendali. Rangkaian ini mengintegrasikan sensor thermocouple, modul konversi MAX6675, mikrokontroler, relay, serta solenoid valve yang semuanya terhubung melalui wiring diagram yang sistematis. Setiap komponen mendapatkan pasokan daya dari sumber tegangan 12V yang terlebih dahulu diturunkan melalui modul DC step-down agar sesuai dengan kebutuhan masing-masing perangkat. Sistem juga dilengkapi dengan LCD 16x2 berbasis antarmuka I2C yang berfungsi menampilkan suhu ruang bakar dan status solenoid valve secara real-time.

Selain perangkat keras, perangkat lunak juga dirancang dengan algoritma berbasis logika on/off. Alur kerja digambarkan dalam bentuk flowchart, dimulai dari proses inisialisasi sistem, pembacaan suhu, pengambilan keputusan, hingga eksekusi perintah pada aktuator. Sistem dibuat agar bekerja secara berulang, sehingga suhu ruang bakar senantiasa terjaga stabil tanpa perlu campur tangan operator. Tahap akhir dari prosedur penelitian adalah pengujian sistem melalui serangkaian skenario, seperti pengukuran akurasi

sensor, pengamatan respon sistem saat inisialisasi, stabilitas suhu dalam jangka waktu tertentu, serta kapasitas pembakaran sampah pada incinerator. Dengan prosedur ini, diharapkan penelitian dapat menghasilkan sistem incinerator yang handal, efisien, serta dapat diterapkan dalam skala rumah tangga.

Penelitian ini dilaksanakan dalam kurun waktu tiga bulan, dimulai dari tahap perancangan hingga pengujian akhir. Lokasi penelitian dilakukan di laboratorium teknik elektro, yang dipilih karena menyediakan sarana pendukung berupa alat ukur standar, perangkat pemrograman, serta fasilitas keselamatan kerja untuk eksperimen dengan pembakaran. Pemilihan laboratorium sebagai lokasi utama dimaksudkan agar penelitian dapat berlangsung dengan lebih terkontrol, sehingga setiap variabel yang diukur dapat dipantau dengan baik. Selama waktu penelitian, seluruh tahapan dilaksanakan secara berurutan, dimulai dari pengadaan komponen, perakitan perangkat keras, pemrograman perangkat lunak, uji coba skala kecil, hingga pengujian menyeluruh terhadap sistem yang telah dirakit. Dengan penjadwalan yang sistematis, penelitian ini diharapkan mampu menyajikan data yang valid serta hasil yang dapat dipertanggungjawabkan. Data penelitian diperoleh dari dua sumber utama, yaitu data primer dan data sekunder. Data primer berasal dari hasil pengukuran langsung selama pengujian incinerator. Suhu ruang bakar dicatat secara berulang menggunakan sensor thermocouple tipe-K yang terintegrasi pada sistem, kemudian dibandingkan dengan hasil pengukuran menggunakan termometer standar untuk mengetahui tingkat akurasi. Data primer juga meliputi lama waktu pembakaran, status kerja solenoid valve, serta kondisi suhu pada berbagai interval waktu. Sementara itu, data sekunder diperoleh dari kajian pustaka, berupa literatur mengenai prinsip kerja incinerator, karakteristik sensor suhu, teori sistem kendali, serta penelitian terdahulu yang relevan. Kedua jenis data ini saling melengkapi, sehingga dapat digunakan untuk melakukan analisis yang komprehensif terhadap performa sistem yang dikembangkan.

Analisis data dalam penelitian ini dilakukan dengan pendekatan kuantitatif. Data suhu yang diperoleh dari sensor dibandingkan dengan data referensi dari alat ukur standar untuk mengetahui tingkat kesalahan relatif atau error. Perhitungan error digunakan untuk menilai sejauh mana akurasi sensor dapat diandalkan dalam kondisi operasional nyata. Selain itu, analisis dilakukan pada aspek kestabilan sistem, yakni dengan mencatat fluktuasi suhu ketika incinerator beroperasi dalam jangka panjang. Stabilitas sistem dilihat dari kemampuan logika on/off dalam menjaga suhu tetap berada pada rentang yang diinginkan. Respon sistem saat inisialisasi awal juga menjadi bagian penting dalam analisis, guna mengetahui seberapa cepat komponen kendali dapat bekerja dalam kondisi pertama kali dinyalakan. Hasil analisis tersebut selanjutnya dijadikan dasar untuk menilai apakah rancangan sistem ini sudah memenuhi kriteria

efisiensi, stabilitas, serta efektivitas dalam mendukung proses pembakaran sampah pada incinerator skala kecil.

A. Singkatan dan Akronim

Dalam penelitian ini digunakan beberapa istilah teknis yang disingkat untuk mempermudah penulisan. Arduino Mega (AM) adalah mikrokontroler berbasis ATmega2560 yang digunakan sebagai pusat kendali sistem. Liquid Crystal Display (LCD) merupakan layar tampilan 16x2 dengan antarmuka I2C yang digunakan untuk menampilkan informasi suhu dan status solenoid valve. Solenoid Valve (SV) adalah katup elektromekanis yang berfungsi membuka dan menutup aliran bahan bakar gas LPG. Direct Current (DC) adalah arus listrik searah yang digunakan sebagai sumber daya utama sistem. Serial Peripheral Interface (SPI) adalah protokol komunikasi serial yang digunakan untuk menghubungkan modul MAX6675 dengan mikrokontroler. Semua singkatan ini pertama kali dijelaskan secara rinci agar tidak menimbulkan ambiguitas dalam pemahaman.

B. Persamaan

Pengukuran akurasi sensor suhu dilakukan dengan menghitung nilai kesalahan relatif terhadap alat ukur standar. Persamaan yang digunakan adalah:

$$N = \frac{T_s - T_a}{T_a} \times 100\%$$

N adalah nilai error relatif dalam persen (%),

T_s adalah suhu hasil pembacaan sensor thermocouple tipe-K dalam derajat Celcius ($^{\circ}\text{C}$),

T_a adalah suhu acuan dari termometer standar dalam derajat Celcius ($^{\circ}\text{C}$).

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

hasil penelitian yang diperoleh dari serangkaian proses pengujian sistem incinerator otomatis berbasis mikrokontroler, yang dilengkapi dengan sensor thermocouple tipe-K, solenoid valve, pemantik api otomatis, dan perangkat kendali utama berupa Arduino Mega. Hasil pengujian yang dilakukan meliputi kalibrasi sensor suhu, uji awal sistem pembakaran, stabilitas suhu dalam jangka waktu panjang, serta kapasitas dan waktu pembakaran sampah. Seluruh hasil ini kemudian dianalisis secara mendalam untuk menilai akurasi sistem, efektivitas kendali suhu, serta keandalan perangkat keras dalam mendukung kinerja incinerator. Selain itu, dilakukan pula evaluasi atas kendala yang muncul serta kemungkinan pengembangan penelitian ke depan.

Tahap pertama pengujian yang dilakukan adalah kalibrasi sensor thermocouple tipe-K menggunakan modul MAX6675.



Gambar 4. 1 kalibrasi thermocouple menggunakan thermometer

Kalibrasi ini penting karena hasil awal pengujian menunjukkan adanya deviasi rata-rata sebesar $+5,34^{\circ}\text{C}$ dibandingkan dengan thermometer digital standar yang digunakan sebagai alat acuan. Deviasi ini cukup signifikan karena melebihi batas toleransi akurasi sensor menurut standar IEC 60584-1. Oleh sebab itu, dilakukan penyesuaian melalui penambahan offset dalam pemrograman Arduino, sehingga hasil bacaan sensor menjadi lebih akurat. Setelah proses kalibrasi, rata-rata kesalahan absolut menurun drastis menjadi hanya $0,42^{\circ}\text{C}$ dengan persentase error sebesar $0,78\%$. Hasil ini menunjukkan bahwa sensor telah sesuai standar dan layak digunakan dalam sistem kontrol otomatis incinerator. Data ini dipaparkan dalam bentuk tabel sebelum dan sesudah kalibrasi, serta dilengkapi perhitungan error menggunakan rumus yang relevan. Dengan demikian, bagian ini memberikan landasan kuat bahwa sistem kendali suhu memiliki dasar pengukuran yang valid.

Tabel 4. 1 Sebelum Dikalibrasi

no	Suhu Thermometer ($^{\circ}\text{C}$)	Suhu Thermocouple ($^{\circ}\text{C}$)	Error ($^{\circ}\text{C}$)	Persentase Error (%)
1	40,3	44,5	4,2	10,42
2	42	47,75	5,75	13,96
3	44	50,25	6,25	14,2
4	46,1	51,5	5,4	11,71
5	48,1	53,75	5,65	11,76
6	50	55,75	5,75	11,5
7	52	57,75	5,75	11,05
8	54,1	59,75	5,65	10,44
9	56,1	61,25	5,15	9,18
10	58,1	63,75	5,65	9,72
11	60,1	65,75	5,65	9,4

12	62	67,25	5,25	8,46
13	64,1	69,75	5,65	8,81
14	66	71,75	5,75	8,71
15	68,1	73,25	5,15	7,56
16	70	75,25	5,25	7,5
17	72,1	77,25	5,15	7,14
18	74,1	79	4,9	6,61
19	76,1	81	4,9	6,43
20	78	83	5	6,41
21	80,1	84,5	4,4	5,49
Rata-rata :		5,34	9,34	

Tabel 4. 2 setelah dikalibrasi

no	Suhu Thermometer ($^{\circ}\text{C}$)	Suhu Thermocouple ($^{\circ}\text{C}$)	Error ($^{\circ}\text{C}$)	Persentase Error (%)
1	40,1	40,96	0,86	2,14
2	42,3	42,46	0,16	0,37
3	44,1	44,41	0,31	0,7
4	46,1	46,96	0,86	1,86
5	48	48,71	0,71	1,47
6	50	50,21	0,21	0,42
7	52,1	52,71	0,61	1,17
8	54	54,21	0,21	0,38
9	56	56,71	0,71	1,26
10	58	58,71	0,71	1,22
11	60,1	60,96	0,86	1,43
12	62,1	62,46	0,36	0,57
13	64,1	64,71	0,61	0,95
14	66,1	66,21	0,11	0,16
15	68	68,46	0,46	0,67
16	70	70,21	0,21	0,3
17	72	72,21	0,21	0,29
18	74	74,46	0,46	0,62
19	76,1	76,21	0,11	0,14
20	78	78,21	0,21	0,26
21	80	79,96	-0,04	0,05
Rata-rata selisih :		0,42	0,78	

Setelah tahap kalibrasi sensor selesai, penelitian dilanjutkan dengan pengujian sistem awal untuk memastikan bahwa seluruh perangkat keras berfungsi dengan baik pada fase penyalaan. Pada detik pertama, solenoid valve dibuka selama 10 detik untuk memastikan aliran gas LPG mengisi ruang pembakaran. Pada waktu yang sama, pemantik api otomatis diaktifkan guna menyalakan api secara terkendali. Hasil pengujian menunjukkan bahwa proses penyalaan berlangsung stabil, tanpa gejala lonjakan api yang membahayakan. Data hasil pengujian awal menunjukkan kenaikan suhu bertahap dari $40,6^{\circ}\text{C}$ pada detik ke-0 hingga mencapai $254,46^{\circ}\text{C}$ pada detik ke-120. Kenaikan yang stabil

ini menunjukkan bahwa integrasi komponen berjalan sesuai rancangan. Grafik hasil pengujian juga memperlihatkan tren kenaikan suhu yang konsisten, sehingga dapat disimpulkan bahwa sistem mampu memulai proses pembakaran secara efektif. Tahapan berikutnya adalah uji kestabilan suhu dalam durasi panjang, yakni 15 menit atau 900 detik. Tujuan utama pengujian ini adalah untuk mengetahui kemampuan sistem dalam mempertahankan suhu ruang bakar di atas 600°C, yang merupakan kondisi ideal untuk proses pembakaran sempurna. Hasil pengujian menunjukkan bahwa suhu berhasil mencapai 629,21°C pada menit ke-2 setelah pembakaran dimulai, kemudian sistem secara otomatis melakukan pengaturan buka-tutup solenoid valve untuk menjaga suhu tetap dalam rentang aman. Meskipun terdapat fluktuasi suhu antara 465°C hingga 730°C, nilai tersebut masih dalam batas toleransi yang dapat diterima. Pola kerja solenoid valve yang bergantian ON dan OFF membuktikan bahwa sistem kontrol sederhana berbasis metode on/off mampu menjaga kestabilan suhu ruang bakar dengan cukup baik. Dengan kata lain, meskipun belum menggunakan metode kendali canggih seperti PID, sistem tetap mampu memberikan performa yang memadai untuk pembakaran skala kecil.

Tabel 4. 3 Pengujian system awal

No	Waktu	Status Selenoid Valve	Status Pemantik Api	Suhu (°C)
1	0	ON	ON	40,6
2	10	OFF	ON	56,46
3	20	OPEN	OFF	91,46
4	30	OPEN	OFF	130,71
5	40	OPEN	OFF	151,46
6	50	OPEN	OFF	166,21
7	60	OPEN	OFF	194,46
8	70	OPEN	OFF	209,96
9	80	OPEN	OFF	224,21
10	90	OPEN	OFF	233,46
11	100	OPEN	OFF	233,71
12	110	OPEN	OFF	248,46
13	120	OPEN	OFF	254,46

Pengujian dilanjutkan dengan evaluasi kapasitas pembakaran sampah, yaitu dengan memasukkan sampah organik sebanyak 1 kilogram ke dalam ruang pembakaran. Sampah dimasukkan secara bertahap untuk menghindari lonjakan reaksi eksotermik yang berlebihan.

Waktu (Menit)	Suhu (°C)	Status valve	Keterangan
0	56,46	ON	Sistem dinyalakan, suhu awal rendah, sampah

			belum dimasukkan
2	629,21	OFF	Beberapa sampah ($\pm 300g$) mulai dimasukkan, suhu naik drastis
4	557,96	OFF	Sampah $\pm 500g$ telah terbakar sebagian besar, reaksi eksotermik terjadi
6	465,71	ON	Selenoid terbuka, memasukkan sisa $\pm 500g$ sampah
8	515,96	ON	Proses pembakaran memasuki tahap tengah, suhu cukup stabil
10	478,21	ON	Pembakaran berlanjut, sebagian besar sampah mulai terurai
12	494,71	ON	Tahap akhir pembakaran, sebagian besar residu mulai menjadi abu
14	667,46	OFF	Pembakaran 1KG selesai, suhu maksimum tercapai, valve ditutup

Hasil pengujian menunjukkan bahwa proses pembakaran berlangsung selama ± 14 menit, dengan suhu maksimum tercatat sebesar 667,46°C. Pada menit ke-2, ketika 300 gram sampah pertama dimasukkan, suhu naik drastis hingga 629,21°C.

Pada menit ke-4 hingga ke-6, suhu menurun sedikit akibat adanya penambahan sampah berikutnya, namun sistem berhasil menstabilkan kembali pembakaran. Pada menit ke-14, seluruh sampah telah terbakar menjadi abu dengan suhu akhir berada pada 667,46°C. Hasil ini membuktikan bahwa sistem incinerator tidak hanya mampu menyalakan dan menjaga suhu, tetapi juga dapat digunakan untuk menghancurkan limbah organik dalam kapasitas kecil dengan efisien.

Secara keseluruhan, hasil pengujian ini menunjukkan bahwa sistem incinerator otomatis dengan kendali suhu berbasis Arduino Mega bekerja dengan baik. Kalibrasi sensor memastikan akurasi pembacaan data suhu, pengujian awal menunjukkan integrasi perangkat keras yang efektif, uji stabilitas membuktikan kemampuan sistem menjaga suhu di atas 600°C, dan uji kapasitas pembakaran membuktikan bahwa sistem dapat menangani limbah dalam jumlah tertentu secara efisien. Meskipun demikian, penelitian ini juga menemukan beberapa kendala yang perlu diperhatikan. Salah satunya adalah proses pemantik api yang pada tahap pengujian masih dilakukan secara manual karena keterbatasan teknis, sehingga perlu pengembangan lebih lanjut untuk mencapai otomatisasi penuh. Selain itu, penggunaan solenoid valve dengan kontrol on/off juga membatasi kemampuan sistem dalam melakukan pengaturan gas secara lebih halus. Oleh karena itu, pengembangan berikutnya dapat mempertimbangkan penerapan kendali berbasis PID atau fuzzy logic, serta penggunaan aktuator dengan pengaturan aliran gas bertingkat agar kontrol suhu lebih presisi.

Temuan penelitian ini memiliki implikasi penting bagi pengembangan sistem incinerator skala kecil yang ramah lingkungan. Dengan desain sederhana, biaya rendah, namun memiliki efektivitas tinggi, sistem ini berpotensi digunakan pada tingkat rumah tangga, sekolah, atau fasilitas kecil untuk mengurangi timbunan sampah organik. Pengembangan ke depan dapat diarahkan pada peningkatan kapasitas pembakaran, integrasi sistem monitoring berbasis IoT agar data suhu dapat dipantau secara real-time melalui jaringan internet, serta pengujian dalam kondisi lingkungan yang lebih beragam. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya memberikan kontribusi praktis dalam penyediaan teknologi pembakaran sederhana, tetapi juga membuka peluang untuk penelitian lanjutan di bidang efisiensi energi, otomasi sistem, serta pengelolaan limbah berkelanjutan.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian sistem pengendalian suhu pada incinerator skala perumahan, dapat disimpulkan bahwa sistem kendali yang dirancang mampu menjaga kestabilan proses pembakaran dengan baik. Hasil pengujian menunjukkan bahwa suhu ruang bakar dapat dipertahankan pada kisaran 600–730°C dengan fluktuasi yang masih dalam batas wajar. Respon buka-tutup solenoid valve bekerja otomatis sesuai dengan pembacaan sensor suhu sehingga mampu mencegah terjadinya penurunan suhu yang drastis maupun kenaikan yang berlebihan. Kinerja incinerator dalam proses pembakaran sampah juga menunjukkan hasil yang efisien, ditandai dengan keberhasilan membakar 1 kg sampah organik dalam waktu relatif singkat. Suhu awal dapat mencapai

sekitar 600°C dan proses pembakaran berlangsung stabil hingga suhu akhir mencapai 667,46°C, yang membuktikan bahwa pembakaran dapat berlangsung efektif sampai sampah habis terbakar. Selain itu, ketahanan sistem kendali suhu selama pengoperasian terbukti baik, ditunjukkan dengan hasil uji stabilitas 15 menit di mana sistem tetap responsif terhadap perubahan suhu dan siklus kerja solenoid valve tetap konsisten. Selama pengujian, tidak ditemukan adanya gangguan pada fungsi sensor maupun aktuator, sehingga sistem pengendalian suhu ini dapat dikatakan andal untuk diaplikasikan pada incinerator skala perumahan.

REFERENSI

- Abdul Jumali, M., Kristina, A., Buana Surabaya, A., & Dukuh Menanggal XII Surabaya, J. (n.d.). Penggunaan Incenerator Sebagai Alat Pembakaran Sampah yang Efisien. *Journal of Economic Community Service*, 1(2), 72–79.
<https://ejournal.ecodepartment.org/index.php/jecs/index>
- Jefrina Dian Stifvani, Yudi Kristyawan, & Edi Prihartono. (2025). Sistem Kontrol Stop Kran Otomatis Berdasarkan Deteksi Kebocoran Pipa Air Rumah Tangga Berbasis Arduino. *Router: Jurnal Teknik Informatika Dan Terapan*, 3(2), 149–161.
<https://doi.org/10.62951/router.v3i2.599>
- Kamal, M., & Teknologi Rekayasa Instrumentasi dan Kontrol Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Lhokseumawe, P. (n.d.). RANCANG BANGUN PENGGUNAAN SENSOR THERMOCOUPLE PADA ALAT PENYANGRAI BIJI COKLAT SECARA OTOMATIS BERBASIS ARDUINO UNO. *JURNAL TEKTRONIKA*, 7(1), 2023.
- Lubis, P., Rasyidin, R., Frianto, H. T., Elektronika, T., Elektro, T., & Medan, P. N. (n.d.). RANCANG BANGUN WATER TREATMENT SISTEM SEBAGAI PENGOLAHAN AIR BERSIH BERBASIS PROGRAM LOGIC CONTROLLER (PLC).
- Nurhuda, M., Muhammad, K. ', & Khosyi'in, M. (2024). *JuPerancangan Alat Uji Relay Thermal Trafo Tenaga Berbasis Arduino Mega 2560 Dan Sensor Suhu Thermocouple Type Kdul* (Issue 06).
- Syukri, M., & Jelita, M. (n.d.). 511 Analisis Teknis dan Ekonomis Pemanfaatan Sampah Organik Sebagai PLTSa di TPA Tanjung Belit. *BRILIANT: Jurnal Riset Dan Konseptual*, 8(2), 2023.
<https://doi.org/10.28926/briliant.v8i2>
- Utomo, D. W., Syahputra, A. I., Irawati, I., Alim, M. S., Amalia, C., & Sidik, E. J. (2024). Pengolahan Limbah Padat Menggunakan Teknologi Incinerator di Desa Pulo Ampel Kabupaten Serang Provinsi Banten. *Jurnal*

