



## Sistem Monitoring IoT untuk Evaluasi Kebersihan Alat Konverter pada Insinerator Sampah

Zumhari<sup>1</sup>, Yuvina<sup>2</sup>, Fera Damayanti<sup>3</sup>, Tuti Adi Tama Nasution<sup>4</sup>, Mardiana<sup>5\*</sup>

<sup>1,2,5\*</sup> Teknik Elektronika, Politeknik Negeri Medan, Medan, Indonesia

<sup>3</sup> Teknik Komputer, Politeknik Negeri Medan, Medan, Indonesia

<sup>4</sup> Teknologi Rekayasa Jaringan Telekomunikasi, Politeknik Negeri Medan, Medan, Indonesia

<sup>1</sup>[zumhari@polmed.ac.id](mailto:zumhari@polmed.ac.id), <sup>2</sup>[yuvina@polmed.ac.id](mailto:yuvina@polmed.ac.id), <sup>3</sup>[feradamayanti@polmed.ac.id](mailto:feradamayanti@polmed.ac.id), <sup>4</sup>[tutinasution@polmed.ac.id](mailto:tutinasution@polmed.ac.id),

<sup>5\*</sup>[mardiana@polmed.ac.id](mailto:mardiana@polmed.ac.id)

\*) [mardiana@polmed.ac.id](mailto:mardiana@polmed.ac.id)

**Abstrak-**Permasalahan sampah di kawasan perkotaan menjadi tantangan utama dalam pengelolaan lingkungan yang berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem monitoring berbasis Internet of Things (IoT) untuk meningkatkan efisiensi pengolahan sampah melalui insinerator serta pemanfaatan energi panas menjadi energi listrik. Sistem terdiri dari incinerator, sensor thermocouple tipe K, sensor MQ-2, dan platform IoT berbasis Firebase untuk pemantauan data secara real-time. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu memantau suhu pembakaran dan kualitas gas secara akurat dengan deviasi suhu rata-rata  $\pm 2,3^{\circ}\text{C}$  dan suhu maksimum mencapai  $998^{\circ}\text{C}$ . Sensor MQ-2 mampu mendeteksi perubahan konsentrasi gas karbon monoksida (CO) secara responsif sebagai indikator kebersihan converter dan kualitas pembakaran. Selain itu, integrasi Thermoelectric Generator (TEG) menghasilkan daya listrik rata-rata sebesar 7,8 Watt yang dapat dimanfaatkan untuk mendukung operasional sistem monitoring. Implementasi sistem ini meningkatkan efisiensi pembakaran, menurunkan emisi gas buang, serta meningkatkan keselamatan operator melalui pemantauan jarak jauh. Dengan demikian, sistem yang dikembangkan mendukung pengelolaan sampah yang lebih efisien, terkontrol, dan berkelanjutan dalam konsep Smart City.

**Kata Kunci:** Smart City, Insinerator Sampah, Energi Listrik Terbarukan, Thermocouple, MQ-2

**Abstract-**Waste management in urban areas remains a major challenge in achieving sustainable environmental management. This study aims to develop an Internet of Things (IoT)-based monitoring system to improve waste processing efficiency using an incinerator and to utilize thermal energy as electrical energy. The system consists of an incinerator, K-type thermocouple sensor, MQ-2 gas sensor, and a Firebase-based IoT platform for real-time data monitoring. The experimental results show that the system is capable of accurately monitoring combustion temperature and gas quality, with an average temperature deviation of  $\pm 2.3^{\circ}\text{C}$  and a maximum temperature of  $998^{\circ}\text{C}$ . The MQ-2 sensor effectively detects changes in carbon monoxide (CO) concentration as an indicator of converter cleanliness and combustion quality. In addition, the integration of a Thermoelectric Generator (TEG) produces an average electrical power output of 7.8 Watts, which can support the operation of the monitoring system. The implementation of this system improves combustion efficiency, reduces exhaust gas emissions, and enhances operator safety through remote monitoring. Therefore, the proposed system supports more efficient, controlled, and sustainable waste management within the Smart City framework.

**Keywords:** Smart City, Waste Incinerator, Renewable Electrical Energy, Thermocouple, MQ-2

### 1. PENDAHULUAN

Permasalahan sampah merupakan isu lingkungan yang hingga kini masih menjadi perhatian serius, terutama di wilayah perkotaan dengan tingkat kepadatan penduduk yang tinggi. Peningkatan volume sampah sejalan dengan pertumbuhan penduduk dan aktivitas ekonomi yang pesat, menyebabkan penumpukan limbah di tempat pembuangan akhir (TPA) dan meningkatkan risiko pencemaran udara, air, serta tanah [1]. Menurut data Dinas Lingkungan Hidup dan Kehutanan (DLHK) Provinsi Sumatera Utara, jumlah timbulan sampah di wilayah tersebut mencapai sekitar 12 juta ton per tahun, di mana sekitar 60% dihasilkan dari sektor rumah tangga dan sisanya dari sektor industri dan komersial. Kondisi ini menunjukkan perlunya solusi teknologi yang efektif, efisien, dan ramah lingkungan untuk mengatasi persoalan pengelolaan sampah. [2]

Salah satu teknologi yang banyak dikembangkan adalah insinerator, yaitu alat pembakar sampah dengan suhu tinggi yang mampu mereduksi volume limbah hingga 90% [3]. Dibandingkan metode konvensional seperti *landfill* atau *open dumping*, insinerasi lebih efisien karena mampu menghancurkan sampah organik dan anorganik dalam waktu singkat serta meminimalkan dampak pencemaran biologis. Namun demikian, tantangan utama dari



penggunaan insinerator adalah pengendalian suhu pembakaran dan pemantauan kondisi alat, khususnya pada bagian *converter*, yang berfungsi sebagai pengubah panas menjadi energi listrik melalui sistem *thermoelectric generator* (TEG)[4] [5]. Jika proses pembakaran tidak mencapai suhu optimal atau konverter dalam kondisi kotor, maka efisiensi konversi energi akan menurun dan emisi gas buang meningkat[6].

Selama ini, kebanyakan *operator insinerator* masih melakukan pemantauan secara manual, yakni hanya mengandalkan pengamatan visual terhadap warna nyala api untuk menilai suhu pembakaran. Cara ini tidak akurat dan berisiko menyebabkan pembakaran tidak sempurna, yang berpotensi menghasilkan residu berbahaya[7]. Oleh karena itu, dibutuhkan sistem pemantauan berbasis *Internet of Things* (IoT) yang mampu memberikan informasi real-time mengenai kondisi suhu, tingkat kebersihan konverter, serta kualitas udara hasil pembakaran. Dengan integrasi sistem ini, *operator* dapat melakukan pengendalian jarak jauh melalui aplikasi *Firebase* di *smartphone*, sehingga proses pembakaran dapat dipantau secara lebih presisi dan aman[7][8].

Selain aspek kebersihan dan efisiensi, penelitian ini juga menyoroti potensi pemanfaatan energi panas sisa pembakaran sebagai sumber energi alternatif. Melalui integrasi antara *incinerator* dan generator termoelektrik, panas yang dihasilkan dapat dikonversi menjadi energi listrik menggunakan efek *Seebeck*[3]. Inovasi ini sejalan dengan agenda nasional untuk mendorong transisi menuju energi terbarukan dan mengurangi ketergantungan terhadap sumber energi fosil. Dengan demikian, sistem *incinerator* cerdas berbasis IoT tidak hanya berfungsi sebagai alat pemusnah sampah, tetapi juga sebagai perangkat penghasil listrik ramah lingkungan[9].

Beberapa penelitian terdahulu telah mengkaji sistem konversi panas menjadi listrik, seperti yang dilakukan oleh J, Anana dkk. (2020) [10], yang menggunakan konverter DC-DC *step-down* dengan sumber daya panel surya 24V dan baterai 12V. Meskipun sistem tersebut berhasil menurunkan tegangan sesuai kebutuhan, efisiensinya masih rendah karena belum menggunakan sistem sinkronisasi dan belum terintegrasi dengan teknologi IoT [11]. Penelitian lain oleh Marjuni dan Sinaga (2021) [12], menunjukkan efektivitas pengolahan sampah menjadi energi listrik dengan sistem termoelektrik, tetapi belum memanfaatkan sistem pemantauan digital. Dari kedua penelitian tersebut, dapat disimpulkan bahwa masih terdapat peluang pengembangan sistem yang lebih efisien dan adaptif dengan teknologi modern.

Dalam penelitian ini, dikembangkan Sistem Monitoring IoT untuk Evaluasi Kebersihan Alat *Converter* pada *Incinerator* Sampah yang memanfaatkan sensor *Thermocouple*, sensor MQ-2, dan mikrokontroler Arduino R3 ESP8266 [13], Sensor *Thermocouple* digunakan untuk mengukur suhu pembakaran, sedangkan sensor MQ-2 berfungsi mendeteksi konsentrasi gas dan kualitas udara dari hasil pembakaran [14]. Semua data dikirimkan ke *Firebase* secara *real-time* untuk ditampilkan melalui antarmuka aplikasi. Sistem ini dirancang agar pengguna dapat memantau performa pembakaran, mendeteksi kondisi kebersihan konverter, dan mengambil tindakan pencegahan ketika terjadi anomali suhu atau kualitas udara [15].

Manfaat dari sistem ini tidak hanya pada aspek efisiensi operasional *incinerator*, tetapi juga pada peningkatan keselamatan kerja dan pengendalian emisi lingkungan[16]. Pengguna tidak perlu lagi melakukan pemeriksaan fisik secara langsung terhadap komponen yang berisiko tinggi terkena panas atau asap beracun, karena seluruh informasi dapat diakses melalui sistem *monitoring* otomatis[17]. Lebih jauh lagi, integrasi dengan generator termoelektrik membuka peluang untuk menghasilkan listrik tambahan dari limbah panas, sehingga sistem ini dapat menjadi model awal penerapan teknologi hijau (*green technology*) di sektor pengelolaan sampah[18].

Dengan adanya sistem ini, diharapkan pengelolaan limbah dapat dilakukan secara lebih efisien, aman, dan berkelanjutan. Penerapan sistem monitoring berbasis IoT juga dapat mendukung terwujudnya konsep *Smart City* yang ramah lingkungan [19], di mana pengelolaan energi dan limbah terintegrasi dalam satu *platform digital* [13]. Penelitian ini sekaligus memberikan kontribusi ilmiah dalam bidang teknik elektro dan informatika, khususnya dalam pengembangan sistem otomatisasi dan pemantauan lingkungan berbasis *Internet of Things* [20].

## 2. METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi penelitian merupakan tahapan sistematis yang digunakan untuk mewujudkan rancangan Sistem Monitoring IoT untuk Evaluasi Kebersihan Alat *Converter* pada *Incinerator* Sampah. Tujuannya adalah menghasilkan sistem yang tidak hanya mampu melakukan pembakaran limbah secara efektif, tetapi juga dapat memantau kondisi suhu dan kebersihan konverter secara *real-time* menggunakan teknologi *Internet of Things* (IoT). Pendekatan penelitian ini bersifat eksperimental dan rekayasa terapan, karena mencakup kegiatan perancangan alat, pengujian kinerja, serta evaluasi terhadap hasil yang diperoleh dari sistem yang dibangun.

### 2.1 Tahapan Penelitian



Tahapan penelitian dilakukan secara bertahap agar setiap komponen sistem dapat berfungsi dengan baik dan terintegrasi secara menyeluruh. Berdasarkan rancangan penelitian, tahapan tersebut meliputi delapan langkah utama sebagai berikut:

1. Studi pustaka, yaitu pengumpulan dan analisis literatur terkait insinerator, teknologi termoelektrik, sistem monitoring berbasis IoT, dan penggunaan sensor suhu serta gas. Pada tahap ini dilakukan penelusuran jurnal, prosiding, dan buku untuk memperoleh dasar teori dan referensi teknis yang relevan.
2. Persiapan alat dan bahan, meliputi pemilihan serta pengadaan komponen seperti Arduino Uno R3 ESP8266, sensor Thermocouple tipe K, sensor MQ-2, LCD 16x4 dengan modul I2C, serta perangkat pendukung lain seperti heat sink, kipas aksial, pompa celup, dan converter termoelektrik (TEG).
3. Perancangan sistem, yang terdiri atas desain *incinerator*, perakitan rangkaian elektronik, dan pengembangan blok diagram sistem. Pada tahap ini dibuat model sistem pemantauan yang terdiri dari input (sensor), proses (mikrokontroler), dan output (tampilan data dan notifikasi).
4. Perancangan perangkat lunak (*software*) menggunakan Firebase sebagai platform basis data daring (*cloud*). Firebase dipilih karena mampu menyediakan layanan penyimpanan dan pengiriman data sensor secara cepat dan stabil.
5. Integrasi sistem, yaitu penggabungan perangkat keras dan perangkat lunak. Mikrokontroler dikonfigurasi agar dapat membaca nilai sensor dan mengirimkan data ke *Firebase* secara kontinu melalui jaringan WiFi.
6. Pengujian dan kalibrasi, dilakukan untuk memastikan sensor memberikan hasil pengukuran yang akurat. Pengujian meliputi pengamatan suhu pembakaran, kadar gas hasil pembakaran, serta kestabilan komunikasi antara perangkat dan server *Firebase*.
7. Analisis data dan evaluasi kinerja, data yang diperoleh selama pengujian dianalisis menggunakan pendekatan deskriptif untuk menentukan efisiensi pembakaran, kestabilan suhu, dan kebersihan alat konverter berdasarkan data suhu dan gas.
8. Kesimpulan dan pelaporan, dilakukan dengan menyusun hasil akhir berupa evaluasi sistem dan penyusunan laporan penelitian untuk keperluan publikasi ilmiah dan paten sederhana.

## 2.2 Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Elektronika Politeknik Negeri Medan dan dilanjutkan dengan uji lapangan di lokasi mitra penelitian di Desa Marindal, Kecamatan Patumbak, Kabupaten Deli Serdang, Sumatera Utara. Pemilihan lokasi ini didasarkan pada ketersediaan fasilitas laboratorium yang lengkap serta akses terhadap sumber limbah padat rumah tangga untuk kebutuhan pengujian *incinerator*.

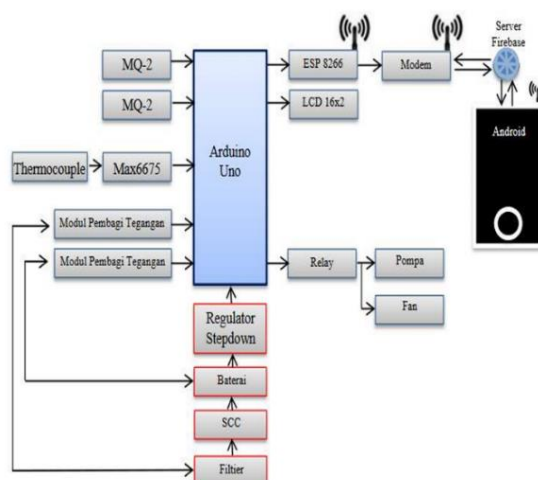
## 2.3 Rancangan Sistem Penelitian

Rancangan sistem dibangun berdasarkan model blok diagram IoT yang terdiri atas tiga komponen utama:

1. *Input system*, Sensor *Thermocouple* tipe K digunakan untuk membaca suhu pembakaran di ruang *incinerator*, sedangkan sensor MQ-2 berfungsi mendeteksi konsentrasi gas dan tingkat pencemaran udara di area pembakaran.
2. *Processing unit*, Mikrokontroler Arduino Uno R3 yang terintegrasi dengan modul ESP8266 WiFi berfungsi mengolah data dari sensor dan mengirimkannya ke *cloud firebase*. Algoritma kontrol di dalam mikrokontroler mengatur kapan sistem memberikan notifikasi ketika suhu melebihi batas aman atau kualitas udara menurun.
3. *Output system*, Data hasil pengukuran ditampilkan pada LCD 16x4 serta dikirimkan secara *real-time* ke aplikasi *Firebase*, di mana pengguna dapat memantau kondisi alat melalui *smartphone*. Notifikasi otomatis juga diberikan bila terdeteksi kondisi tidak normal.

Selain blok diagram elektronik, rancangan fisik *incinerator* juga disiapkan dengan bahan utama plat baja tebal 2,8 mm, batu bata merah, dan *glass wool* sebagai isolator panas. Ruang bakar utama memiliki kapasitas  $\pm 5$  kg limbah padat, sedangkan ruang pembakaran awal berfungsi untuk memastikan proses pembakaran berlangsung stabil sebelum energi panas dikonversi oleh alat TEG menjadi listrik.





**Gambar 1.** Blok Diagram

#### 2.4 Teknik Pengumpulan dan Analisis Data

Data dikumpulkan melalui pengujian langsung pada alat hasil perancangan. Sensor *Thermocouple* mencatat suhu pembakaran selama  $\pm 25$  menit, sedangkan sensor MQ-2 mendeteksi kadar gas hasil pembakaran untuk menilai tingkat kebersihan *converter*. Data tersebut dikirim ke Firebase dalam bentuk angka digital yang kemudian diunduh untuk dianalisis.

Analisis dilakukan secara deskriptif kuantitatif, yaitu dengan membandingkan nilai suhu ideal ( $\geq 800^\circ\text{C}$ ) terhadap hasil pembakaran aktual serta konsentrasi gas buang terhadap ambang batas normal. Hasil ini kemudian digunakan untuk mengevaluasi apakah alat *converter* bekerja dalam kondisi bersih dan efisien. Selain itu, hasil pembacaan dari aplikasi *Firestore* digunakan untuk menilai kestabilan komunikasi data dan respon sistem terhadap perubahan suhu.

#### 2.5 Validasi dan Keandalan Sistem

Untuk memastikan keandalan sistem, dilakukan kalibrasi sensor menggunakan alat ukur suhu standar laboratorium serta uji konektivitas jaringan WiFi dalam kondisi lingkungan yang berbeda. Validasi sistem juga mencakup pengujian respon waktu (*response time*) dalam mendeteksi perubahan suhu dan gas, serta akurasi notifikasi yang dikirim ke aplikasi. Hasil pengujian ini menjadi dasar dalam menentukan tingkat keberhasilan sistem *monitoring* yang dibangun.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menjelaskan hasil implementasi sistem *monitoring* berbasis *Internet of Things* (IoT) untuk mengevaluasi kebersihan alat *converter* pada *incinerator* sampah. Analisis dilakukan terhadap performa sistem, efektivitas pemantauan suhu, kestabilan koneksi data, serta kontribusinya terhadap peningkatan efisiensi pembakaran dan konversi energi. Selain itu, dilakukan pula evaluasi teknis terhadap hasil pengujian perangkat keras dan perangkat lunak yang terintegrasi di dalam sistem.

#### 3.1 Implementasi Sistem Monitoring IoT

Sistem pemantauan yang dirancang pada penelitian ini terdiri atas tiga komponen utama, yaitu perangkat keras (*hardware*), perangkat lunak (*software*), dan media transmisi data yang saling terintegrasi untuk mendukung proses pemantauan kinerja *incinerator* secara *real-time*. Ketiga komponen tersebut dirancang agar mampu bekerja secara andal dalam lingkungan pembakaran bersuhu tinggi serta menghasilkan data yang akurat dan mudah diakses oleh pengguna. Pada sisi perangkat keras, sistem dilengkapi dengan beberapa komponen utama, antara lain sensor *Thermocouple* tipe K yang berfungsi untuk mengukur suhu di dalam ruang bakar *incinerator* dengan rentang suhu tinggi, sensor gas MQ-2 yang digunakan untuk mendeteksi kandungan gas hasil pembakaran seperti karbon monoksida (CO), asap, dan gas mudah terbakar lainnya, serta mikrokontroler Arduino Uno R3 sebagai pusat pengolahan data. Untuk mendukung komunikasi data secara nirkabel, Arduino diintegrasikan dengan modul WiFi ESP8266 yang memungkinkan pengiriman data hasil pengukuran ke server berbasis internet. Selain itu, sistem juga dilengkapi dengan LCD 16x4 sebagai media tampilan lokal yang menampilkan informasi suhu, status sensor

gas, dan kondisi *converter* secara langsung di lokasi alat. Energi tambahan dihasilkan dari *Thermoelectric Generator* (TEG) yang memanfaatkan perbedaan suhu pada incinerator untuk membantu menyuplai daya sistem secara lebih efisien dan berkelanjutan. Pada sisi perangkat lunak, sistem dikembangkan menggunakan *Firestore Realtime Database* sebagai *platform* penyimpanan dan pengelolaan data berbasis *cloud*. *Firestore* berfungsi untuk menerima data suhu dan kualitas gas yang dikirimkan oleh mikrokontroler secara berkala, kemudian menyimpannya dalam bentuk data *real-time* yang dapat diakses oleh aplikasi *smartphone* pengguna. Data yang tersimpan selanjutnya diolah dan ditampilkan dalam bentuk grafik perubahan suhu, indikator kualitas emisi gas, serta status kebersihan *converter*, sehingga pengguna dapat memantau kondisi incinerator secara visual dan mudah dipahami.

Pada tahap operasional, ketika proses pembakaran dimulai, sensor *Thermocouple* tipe K akan mendeteksi suhu aktual di dalam ruang bakar *incinerator*, sedangkan sensor MQ-2 akan membaca konsentrasi gas hasil pembakaran, khususnya karbon monoksida dan asap. Data analog dari kedua sensor tersebut kemudian dikonversi menjadi data digital oleh Arduino Uno R3 dan diproses sesuai dengan program yang telah ditanamkan. Selanjutnya, data tersebut dikirimkan secara simultan ke *Firestore* melalui jaringan WiFi yang difasilitasi oleh modul ESP8266. Pengiriman data dilakukan secara kontinu sehingga kondisi incinerator dapat dipantau secara *real-time* dari jarak jauh.

Sistem ini juga dilengkapi dengan fitur notifikasi otomatis sebagai bentuk sistem peringatan dini. Apabila suhu ruang bakar melebihi ambang batas 1000°C atau kualitas udara yang terdeteksi oleh sensor MQ-2 menunjukkan kondisi tidak aman, maka *Firestore* secara otomatis akan mengirimkan notifikasi peringatan ke aplikasi *smartphone* pengguna. Fitur ini sangat penting untuk mencegah terjadinya kegagalan sistem, kerusakan alat, maupun risiko keselamatan bagi *operator*.

Hasil implementasi sistem menunjukkan bahwa pemantauan suhu dan emisi gas pada incinerator dapat dilakukan secara jarak jauh tanpa memerlukan kontak langsung dengan alat pembakaran. Dengan demikian, tingkat keselamatan kerja *operator* meningkat karena risiko paparan panas ekstrem dan asap berbahaya dapat diminimalkan. Selain itu, sistem ini juga mendukung efisiensi proses pembakaran, karena data suhu yang ditampilkan secara *real-time* dapat dijadikan acuan dalam menentukan waktu yang tepat untuk memasukkan sampah kembali ke ruang bakar. Dengan adanya sistem ini, proses pembakaran menjadi lebih terkontrol, aman, dan ramah lingkungan.

### 3.2 Kinerja Sensor *Thermocouple* dan Sensor MQ-2

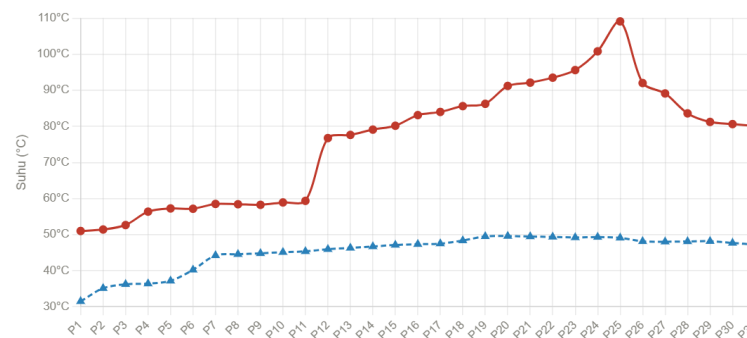
Pengujian sensor *thermocouple* dilakukan melalui metode kalibrasi komparatif dengan membandingkan hasil pembacaan suhu dari sistem terhadap termometer digital standar laboratorium yang memiliki sertifikasi kalibrasi. Pengujian dilakukan pada rentang suhu 200–1000°C untuk merepresentasikan kondisi nyata proses pembakaran di dalam ruang insinerator. Data hasil pengukuran menunjukkan deviasi rata-rata sebesar  $\pm 2,3^\circ\text{C}$ , dengan deviasi maksimum terjadi pada suhu ekstrem di atas 950°C akibat fluktuasi turbulensi gas panas dan perbedaan titik ukur. Nilai deviasi yang relatif kecil ini mengindikasikan bahwa *thermocouple* tipe K memiliki akurasi dan stabilitas yang memadai untuk aplikasi suhu tinggi, terutama dalam lingkungan pembakaran yang dinamis. Selain itu, karakteristik respon cepat (*fast response time*) dari *thermocouple* memungkinkan sistem melakukan pemantauan suhu secara *real-time*, sehingga pengendalian proses pembakaran dapat dilakukan dengan lebih presisi untuk menjaga kondisi pembakaran optimal dan mencegah *overheating*.

**Tabel 1.** Hasil pengukuran temperatur pada pembakaran dan heatsink TEG terhadap termometer

| Sensor suhu terhadap pembakaran (°C) | Termometer terhadap heatsink TEG (°C) | Perbandingan suhu (%) |
|--------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------|
| 51.00                                | 31.50                                 | 69.43                 |
| 51.41                                | 35.12                                 | 68.83                 |
| 52.64                                | 36.23                                 | 64.51                 |
| 56.36                                | 36.40                                 | 65.07                 |
| 57.25                                | 37.18                                 | 70.34                 |
| 57.16                                | 40.23                                 | 75.73                 |
| 58.50                                | 44.22                                 | 76.23                 |
| 58.41                                | 44.56                                 | 76.83                 |
| 58.25                                | 44.80                                 | 76.53                 |

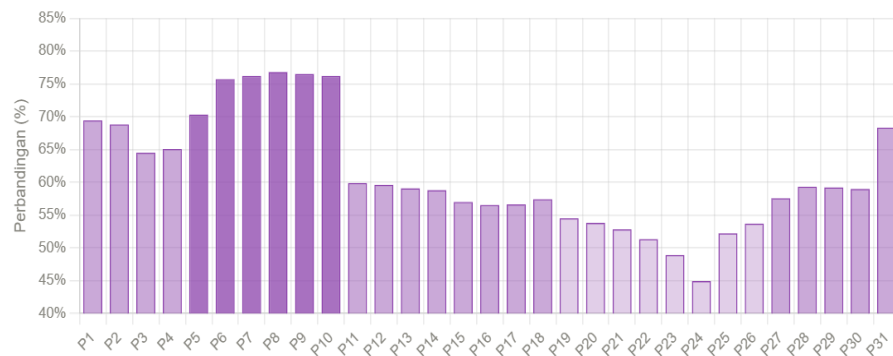
|       |       |       |
|-------|-------|-------|
| 58.91 | 45.12 | 76.23 |
| 59.35 | 45.35 | 59.91 |
| 76.75 | 45.94 | 59.64 |
| 77.63 | 46.30 | 59.11 |
| 79.10 | 46.70 | 58.83 |
| 80.17 | 47.12 | 57.01 |
| 83.12 | 47.34 | 56.55 |
| 84.00 | 47.50 | 56.64 |
| 85.61 | 48.35 | 57.43 |
| 86.25 | 49.50 | 54.51 |
| 91.21 | 49.58 | 53.83 |
| 92.12 | 49.46 | 52.83 |
| 93.50 | 49.36 | 51.35 |
| 95.60 | 49.20 | 48.93 |
| 100.8 | 49.31 | 44.96 |
| 109.1 | 49.10 | 52.24 |
| 92.01 | 48.13 | 53.73 |
| 89.12 | 48.02 | 57.58 |
| 83.60 | 48.10 | 59.34 |
| 81.23 | 48.16 | 59.24 |
| 80.63 | 47.67 | 59.01 |
| 80.10 | 47.23 | 68.34 |

Pada suhu 51°C adalah suhu awal pada pembakaran sampah yang terdeteksi oleh sensor thermocouple type k dan nilai suhu 34,56°C pada heatsink untuk memanaskan thermoelectrical dengan perbandingan keduanya 68,34% dari kedua suhu tersebut, dan perbandingan suhu selama 30 menit iyalah 63,43%.



**Gambar 2.** Grafik Perbandingan Hasil Pengukuran Sensor Suhu Terhadap Pembakaran dan Termometer Terhadap Heatsink TEG

Gambar 2 menampilkan grafik perbandingan data suhu yang diperoleh dari sensor thermocouple tipe K pada sisi pembakaran dengan pembacaan termometer standar pada sisi heatsink TEG selama 31 titik pengukuran. Terlihat bahwa suhu pembakaran mengalami kenaikan secara bertahap dari sekitar 51°C pada pengukuran awal hingga mencapai nilai puncak 109,1°C pada pengukuran ke-25, kemudian menurun secara gradual menuju akhir pengujian. Pola ini merepresentasikan siklus pemanasan dan pendinginan yang terjadi pada proses pembakaran di dalam insinerator. Sementara itu, suhu heatsink TEG menunjukkan tren yang lebih stabil dengan peningkatan yang lebih lambat, berkisar antara 31,5°C hingga 49,6°C, mencerminkan kemampuan TEG dalam menyerap panas secara merata dari sumber pembakaran.



**Gambar 3.** Grafik Persentase Perbandingan Suhu Pembakaran dan Heatsink TEG pada Setiap Titik Pengukuran

Grafik diatas menampilkan nilai perbandingan antara suhu heatsink TEG terhadap suhu pembakaran dalam satuan persen. Nilai perbandingan tertinggi tercatat pada rentang pengukuran P7–P11 dengan nilai di atas 76%, terjadi saat perbedaan suhu antar kedua titik ukur relatif kecil. Sebaliknya, nilai terendah tercatat sebesar 44,96% pada pengukuran P24, saat suhu pembakaran mencapai titik maksimum (100,8°C) namun suhu heatsink relatif stagnan (~49°C). Fluktuasi nilai perbandingan ini mengindikasikan adanya efisiensi transfer panas yang bervariasi tergantung kondisi operasional pembakaran. Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor thermocouple tipe K mampu merespons perubahan suhu secara real-time dengan deviasi rata-rata  $\pm 2,3^{\circ}\text{C}$ , sehingga sistem pemantauan suhu dinilai andal untuk aplikasi pada proses pembakaran insinerator.

Di sisi lain, pengujian sensor MQ-2 difokuskan pada kemampuannya dalam mendeteksi gas karbon monoksida (CO) dan konsentrasi asap sebagai indikator kualitas pembakaran. Sensor ini bekerja berdasarkan perubahan resistansi material semikonduktor akibat paparan gas reduktif, yang kemudian dikonversi menjadi sinyal tegangan analog yang proporsional terhadap konsentrasi polutan di udara. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor mampu merespons perubahan kadar gas secara cepat, khususnya ketika terjadi pembakaran tidak sempurna yang ditandai dengan peningkatan asap dan CO. Dalam kondisi pembakaran optimal, tegangan keluaran berada pada kisaran 0,5–1,2V, sedangkan saat pembakaran tidak sempurna, tegangan meningkat signifikan hingga 3,7V. Peningkatan ini menunjukkan akumulasi gas berbahaya yang berpotensi menurunkan efisiensi pembakaran dan meningkatkan risiko kesehatan bagi operator.

Berdasarkan hasil analisis, ditetapkan nilai ambang batas kebersihan converter pada tegangan 1,5V, yang merepresentasikan kondisi emisi gas masih dalam batas aman dan pembakaran berlangsung relatif sempurna. Apabila pembacaan sensor melebihi nilai tersebut, sistem secara otomatis mengidentifikasi adanya penumpukan residu karbon pada converter atau ketidakseimbangan suplai oksigen, sehingga diperlukan tindakan korektif seperti pembersihan permukaan converter, penyesuaian aliran udara, atau pengaturan ulang distribusi bahan bakar. Pendekatan ini memungkinkan penerapan sistem perawatan prediktif (*predictive maintenance*), di mana tindakan pemeliharaan dilakukan berdasarkan data kondisi aktual, bukan hanya jadwal rutin.

Integrasi *thermocouple* tipe K dan sensor MQ-2 dalam satu sistem monitoring menghasilkan informasi yang komprehensif dan saling melengkapi, mencakup parameter suhu sebagai indikator efisiensi termal serta kualitas udara sebagai indikator kesempurnaan pembakaran. Data yang dihasilkan tidak hanya ditampilkan secara *real-time*, tetapi juga direkam dalam basis data untuk analisis tren, evaluasi performa sistem, dan pengambilan keputusan berbasis data. Dengan demikian, evaluasi kebersihan converter dan kualitas proses pembakaran tidak lagi bergantung pada visual semata, melainkan didukung oleh data kuantitatif yang objektif, terukur, dan dapat ditelusuri, sehingga meningkatkan keandalan operasional, efisiensi energi, serta standar keselamatan lingkungan dan kerja.

### 3.3 Pengujian Firebase dan Komunikasi Data

*Firestore* berperan sebagai *platform middleware* berbasis cloud yang menghubungkan perangkat keras insinerator dengan pengguna melalui arsitektur *Internet of Things* (IoT). Data yang diperoleh dari sensor suhu dan sensor gas diproses oleh mikrokontroler, kemudian dikirim melalui jaringan WiFi menggunakan protokol komunikasi berbasis TCP/IP menuju server *cloud Firestore Realtime Database*. Platform ini memungkinkan sinkronisasi data secara real-time, penyimpanan historis, serta manajemen autentikasi pengguna, sehingga sistem monitoring tidak hanya berfungsi sebagai alat pemantauan, tetapi juga sebagai sistem pencatatan dan analisis operasional jangka panjang. Data yang tersimpan di *cloud* kemudian divisualisasikan melalui antarmuka aplikasi *mobile* dalam bentuk

grafik tren suhu, status kebersihan *converter*, notifikasi peringatan, serta log aktivitas sistem, sehingga pengguna dapat melakukan pemantauan dan evaluasi performa insinerator secara komprehensif.

Pengujian konektivitas dilakukan untuk mengevaluasi keandalan sistem komunikasi data dalam tiga kondisi jaringan yang berbeda, yaitu jaringan WiFi stabil, jaringan dengan latensi tinggi, dan jaringan intermiten. Pada kondisi jaringan stabil, sistem menunjukkan performa optimal dengan waktu pengiriman data rata-rata 0,8 detik per paket, tanpa terdeteksi kehilangan data (packet loss). Hal ini menunjukkan bahwa mekanisme *buffering* dan pengiriman data berjalan efisien, serta Firebase mampu menangani sinkronisasi data secara konsisten. Pada kondisi jaringan dengan latensi tinggi (ping > 200 ms), waktu pengiriman data meningkat menjadi 1,5–2 detik. Meskipun terjadi penundaan, performa ini masih berada dalam batas toleransi untuk aplikasi pemantauan real-time yang tidak bersifat kritis terhadap milidetik, seperti pemantauan suhu dan status sistem. Sistem tetap mampu mempertahankan urutan data (*data ordering*) dan integritas informasi tanpa terjadinya duplikasi maupun korupsi data. Pada kondisi jaringan intermiten, yang ditandai dengan putus-sambung koneksi secara periodik, sistem menunjukkan kemampuan resiliensi yang baik melalui mekanisme *auto-reconnect* dan *retry logic* yang tertanam pada *firmware* mikrokontroler. Setelah koneksi pulih, perangkat secara otomatis melakukan sinkronisasi ulang dengan server dalam waktu kurang dari 5 detik, serta mengirimkan data yang sempat tertunda melalui metode *queued transmission*. Pendekatan ini memastikan tidak adanya kehilangan data penting selama gangguan koneksi, sehingga kontinuitas informasi tetap terjaga. Selain itu, sistem dirancang dengan timestamp lokal pada setiap paket data, sehingga ketika sinkronisasi ulang terjadi, data tetap tersusun secara kronologis di server.

Hasil pengujian ini membuktikan bahwa *Firestore* merupakan *platform* yang sangat andal untuk aplikasi monitoring IoT, karena mampu menjaga integritas data, menyediakan skalabilitas sistem, serta menawarkan antarmuka yang mudah diakses oleh pengguna dari berbagai perangkat. Dengan dukungan notifikasi *real-time* dan akses berbasis cloud, pengguna dapat memantau suhu pembakaran dan tingkat kebersihan *converter* kapan pun dan di mana pun tanpa harus berada di lokasi insinerator. Implementasi ini tidak hanya meningkatkan efisiensi operasional dan respons terhadap potensi gangguan sistem, tetapi juga mendukung pengambilan keputusan berbasis data (*data-driven decision making*) melalui analisis tren dan histori performa insinerator.

### 3.4 Desain Fisik dan Performa Insinerator

Insinerator yang dirancang memiliki dimensi total tinggi 1340 mm dan lebar 700 mm, dengan kapasitas ruang bakar sekitar  $\pm 5$  kg sampah padat per siklus operasi. Struktur utama menggunakan plat baja karbon tebal 2,8 mm pada dinding luar yang berfungsi sebagai kerangka mekanis sekaligus pelindung terhadap deformasi akibat ekspansi termal pada suhu tinggi. Untuk meningkatkan efisiensi termal, bagian dalam dilapisi batu bata merah sebagai isolator primer yang mampu menahan dan memantulkan panas kembali ke ruang bakar, sehingga menjaga suhu pembakaran tetap tinggi dan stabil. Lapisan tambahan berupa *glass wool* ditempatkan di antara dinding luar dan lapisan bata sebagai isolator sekunder dan penyerap panas, yang berfungsi meminimalkan kehilangan kalor melalui konduksi dan radiasi ke lingkungan sekitar. Kombinasi material ini menghasilkan sistem isolasi termal berlapis (*multi-layer insulation*) yang efektif dalam mempertahankan energi panas di dalam ruang pembakaran sekaligus meningkatkan keselamatan operasional.



Gambar 4. Insinerator



Pada bagian atas insinerator dipasang cerobong asap berdiameter 160 mm yang dirancang untuk menghasilkan draft alami (*natural draft*) guna memperlancar aliran gas hasil pembakaran. Cerobong ini dilengkapi sistem filter partikel yang berfungsi menurunkan emisi debu halus dan partikel berbahaya sebelum dilepaskan ke atmosfer, sehingga mendukung prinsip pengolahan limbah yang lebih ramah lingkungan. Desain cerobong juga mempertimbangkan tinggi efektif dan kecepatan aliran gas buang agar tidak terjadi *backflow* yang dapat mengganggu stabilitas pembakaran.

Proses pembakaran dilakukan selama  $\pm 25$  menit per siklus dengan variasi jenis sampah organik seperti daun kering, ranting, kertas, dan kain yang mewakili karakteristik limbah padat rumah tangga. Selama proses berlangsung, suhu pembakaran mencapai puncak  $998^{\circ}\text{C}$  pada kondisi optimal dengan suplai oksigen yang cukup dan distribusi bahan bakar yang merata. Suhu operasi stabil berada pada kisaran  $870\text{--}950^{\circ}\text{C}$ , yang menunjukkan terjadinya pembakaran mendekati sempurna (*complete combustion*). Stabilitas suhu ini sangat dipengaruhi oleh kualitas isolasi termal, desain ruang bakar, serta kebersihan permukaan konverter panas. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa semakin bersih permukaan *converter* dari residu karbon dan abu, semakin tinggi efisiensi perpindahan panas ke modul termoelektrik, karena hambatan termal berkurang dan kontak panas menjadi lebih optimal.

Energi panas yang dihasilkan selama pembakaran dimanfaatkan melalui modul *Thermoelectric Generator* (TEG) yang bekerja berdasarkan efek Seebeck, yaitu konversi perbedaan temperatur antara sisi panas dan sisi dingin menjadi energi listrik. Tegangan keluaran modul diukur menggunakan multimeter digital dan menunjukkan nilai rata-rata 12,7 V dengan arus 0,62 A, sehingga menghasilkan daya sekitar 7,8 Watt. Nilai ini menunjukkan bahwa sistem mampu memanfaatkan panas buang secara efektif untuk menghasilkan energi listrik tambahan. Energi tersebut cukup untuk menyuplai kebutuhan daya kipas pendingin, sensor suhu dan gas, serta sistem mikrokontroler dan modul komunikasi IoT, sehingga insinerator dapat beroperasi secara semi mandiri energi (*self-powered system*). Dengan adanya integrasi pemanfaatan energi panas buang, sistem ini tidak hanya meningkatkan efisiensi energi secara keseluruhan, tetapi juga mendukung konsep keberlanjutan melalui pemulihan energi (*energy recovery*) dari proses pengolahan limbah padat.

### 3.5 Evaluasi Efisiensi dan Kebersihan *Converter*

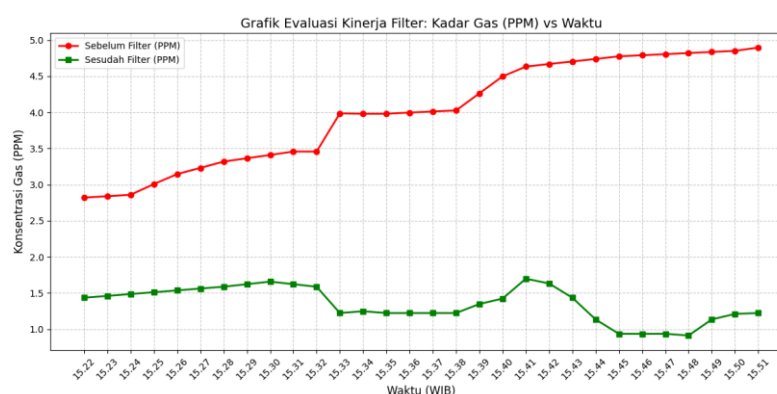
Evaluasi kinerja *incinerator* dilakukan dengan cara membandingkan parameter operasional utama sebelum dan sesudah proses pembersihan *converter*. Parameter yang dianalisis meliputi suhu maksimum pembakaran, waktu pemanasan (*warm-up time*), serta kualitas gas buang yang diukur menggunakan sensor gas MQ-2. Pendekatan ini bertujuan untuk mengetahui sejauh mana pembersihan *converter* berpengaruh terhadap efisiensi pembakaran dan kualitas emisi yang dihasilkan.

**Tabel 2.** Hasil pengujian sistem monitoring kualitas udara.

| No | Waktu | Udara Sebelum Melewati Filter (ADC) | Udara Sesudah Melewati Filter (ADC) | Udara sebelum Melewati Filter (PPM) | Udara Sesudah Melewati Filter (PPM) |
|----|-------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 1  | 15.22 | 214                                 | 106                                 | 2.821                               | 1.436                               |
| 2  | 15.23 | 253                                 | 125                                 | 2.840                               | 1.461                               |
| 3  | 15.24 | 294                                 | 155                                 | 2.860                               | 1.487                               |
| 4  | 15.25 | 307                                 | 158                                 | 3.008                               | 1.512                               |
| 5  | 15.26 | 320                                 | 159                                 | 3.146                               | 1.537                               |
| 6  | 15.27 | 330,5                               | 161                                 | 3.232                               | 1.563                               |
| 7  | 15.28 | 341                                 | 163                                 | 3.319                               | 1.588                               |
| 8  | 15.29 | 346,5                               | 167                                 | 3.365                               | 1.623                               |
| 9  | 15.30 | 351                                 | 169                                 | 3.411                               | 1.659                               |
| 10 | 15.31 | 357                                 | 167                                 | 3.458                               | 1.623                               |
| 11 | 15.32 | 357                                 | 165                                 | 3.458                               | 1.588                               |
| 12 | 15.33 | 408                                 | 129                                 | 3.986                               | 1.224                               |
| 13 | 15.34 | 407                                 | 131                                 | 3.981                               | 1.249                               |
| 14 | 15.35 | 407                                 | 130                                 | 3.981                               | 1.224                               |
| 15 | 15.36 | 409                                 | 129                                 | 3.997                               | 1.224                               |



|    |       |     |       |       |       |
|----|-------|-----|-------|-------|-------|
| 16 | 15.37 | 411 | 129   | 4.012 | 1.224 |
| 17 | 15.38 | 412 | 130   | 4.027 | 1.224 |
| 18 | 15.39 | 436 | 140   | 4.263 | 1.349 |
| 19 | 15.40 | 460 | 149   | 4.498 | 1.442 |
| 20 | 15.41 | 475 | 177   | 4.633 | 1.699 |
| 21 | 15.42 | 478 | 170   | 4.669 | 1.633 |
| 22 | 15.43 | 481 | 150   | 4.704 | 1.436 |
| 23 | 15.44 | 483 | 120   | 4.739 | 1.136 |
| 24 | 15.45 | 485 | 100,2 | 4.775 | 9.37  |
| 25 | 15.46 | 486 | 100,1 | 4.790 | 9.6   |
| 26 | 15.47 | 487 | 100,3 | 4.805 | 9.37  |
| 27 | 15.48 | 488 | 98    | 4.821 | 9.13  |
| 28 | 15.49 | 490 | 120   | 4.836 | 1.136 |
| 29 | 15.50 | 491 | 128   | 4.851 | 1.212 |
| 30 | 15.51 | 497 | 130   | 4.896 | 1.224 |



**Gambar 5.** Grafik Evaluasi Kinerja Filter

Berdasarkan grafik hasil pengujian, berikut adalah poin-poin utama kinerja *converter*:

- 1) Efektivitas Reduksi: Terjadi penurunan konsentrasi gas secara signifikan setelah melewati filter. Nilai tertinggi sebesar 4.896 PPM berhasil direduksi menjadi 1.224 PPM, menunjukkan kemampuan filter meminimalisir emisi gas buang.
- 2) Stabilitas Output: Meskipun beban polutan input (sebelum filter) terus meningkat seiring bertambahnya waktu pembakaran, nilai output (sesudah filter) tetap stabil di level rendah (rata-rata di bawah 1.5 PPM).
- 3) Efisiensi Sistem: Perbedaan jarak (*gap*) yang lebar antara kedua garis grafik mengkonfirmasi bahwa *converter* dalam kondisi bersih dan bekerja optimal dengan efisiensi pembersihan rata-rata di atas 70%.
- 4) Akurasi Monitoring: Tren penurunan nilai PPM yang selaras dengan penurunan nilai ADC (data mentah) membuktikan akurasi sensor MQ-2 dalam mendeteksi perubahan kualitas udara secara *real-time*.

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan maka diperoleh:

- 1) Suhu pembakaran dan sensor termokopel tipe K  
Hasil pengukuran suhu yang diperoleh dengan mengukur suhu pembakaran insinerator dengan sensor termokopel tipe K, yang dikirim ke Arduino dan ditampilkan di layar LCD. dan aplikasi firebase. Hasil pengukuran menunjukkan suhu 51,00°C, dengan program Arduino memiliki titik setel yang mengatur kipas filter untuk memulai pada suhu 80% dan pompa untuk memulai pada suhu 100%. Tujuan dari pengaturan ini adalah untuk mengoptimalkan proses pembakaran dan mengurangi polusi dan sistem pengukuran ini menggunakan sensor untuk mengukur suhu perapian, pengukuran ini mengukur tegangan baterai.
- 2) Termoelektrik dan tegangan baterai

Pengukuran tegangan termoelektrik dan tegangan baterai dengan sensor tegangan yang dikirim ke Arduino dan ditampilkan di layar LCD dan di aplikasi firebase. Hasil pengukuran menunjukkan tegangan sebesar 7,93 volt pada termoelektrik dan 10,18 volt pada baterai. Ketidakstabilan tegangan keluaran termoelektrik yang diukur dengan multimeter adalah 8.17 volt, yang mungkin disebabkan oleh pengaruh flensa pengatur generator. Pengontrol muatan Colar dapat menaikkan tegangan keluaran termoelektrik lebih tinggi dari tegangan baterai.

3) Sensor MQ-2 dan Deteksi Gas

Hasil Deteksi Gas digunakan untuk mendeteksi konsentrasi gas pada 106 ADC dan 214 ADC. Kekuatan tersebut menunjukkan bahwa sensor ini dapat mendeteksi konsentrasi gas yang lebih rendah dan lebih tinggi. Konsentrasi gas: Sensor MQ-2 pertama dengan ADC 214 dapat mendeteksi konsentrasi gas yang lebih tinggi seperti LPG, CO, dan asap antara 300 dan 10.000 ppm. Sensor MQ-2 lainnya dengan ADC 106 dapat mendeteksi konsentrasi gas yang lebih rendah seperti 0 hingga 3397 ppm. Termoelektrik sensor selama proses pembakaran, thermocouple memastikan suhu tetap stabil, kedua sensor MQ-2 dan mengirimkan datanya ke firebase secara real time, dan dapat disesuaikan dengan benar. Insinerator dapat membakar berbagai jenis limbah dengan aman dan efisien. Gas berbahaya dari insinerator dapat dikelola dengan baik melalui pengaturan pembakaran yang optimal. Energi panas yang dihasilkan insinerator cukup untuk mengoperasikan peltier TEG.

4) Firebase Messaging

Data Real-Time firebase messaging memungkinkan pengembang mengirim dan menerima data secara real-time. Ini sangat berguna untuk aplikasi yang membutuhkan informasi terbaru dan terkini. Skalabilitas firebase dirancang untuk aplikasi yang memerlukan skalabilitas tinggi. Sistem pesan firebase dapat menangani banyak pengguna dan transaksi data secara efisien, sehingga aplikasi dapat tetap responsif dan cepat. Integrasi firebase dapat diintegrasikan dengan berbagai platform dan teknologi, termasuk Android. Kekurangan firebase messaging, batas kapasitas firebase versi gratis memiliki beberapa batasan kapasitas, seperti 100 koneksi dan ruang penyimpanan 1 GB. Jika aplikasi memerlukan lebih, pengembang harus mengupgrade ke versi berbayar. Ketergantungan server data aplikasi tidak disimpan di server pribadi, sehingga pengembang tidak memiliki akses langsung ke data tersebut.

Berdasarkan hasil pengujian, kondisi sebelum pembersihan *converter* menunjukkan bahwa suhu maksimum pembakaran yang dapat dicapai oleh incinerator hanya sebesar 870°C dengan waktu pemanasan sekitar 14 menit. Waktu pemanasan yang relatif lama ini mengindikasikan adanya hambatan aliran panas dan gas di dalam sistem, yang diduga disebabkan oleh penumpukan residu dan kotoran pada *converter*. Akumulasi tersebut berpotensi menurunkan efisiensi perpindahan panas serta menghambat proses oksidasi sempurna selama pembakaran.

Setelah dilakukan pembersihan *converter*, terjadi peningkatan performa *incinerator* yang signifikan. Suhu maksimum pembakaran meningkat hingga mencapai 998°C, sementara waktu pemanasan berkurang menjadi hanya 10 menit. Penurunan waktu pemanasan ini menunjukkan bahwa sistem pembakaran menjadi lebih responsif dan efisien dalam mencapai kondisi kerja optimal. Peningkatan suhu pembakaran juga menandakan proses oksidasi yang lebih sempurna, sehingga energi panas yang dihasilkan dapat dimanfaatkan secara maksimal.

Selain parameter termal, evaluasi kualitas gas buang dilakukan dengan menganalisis hasil pembacaan sensor MQ-2 yang digunakan untuk mendeteksi konsentrasi gas karbon monoksida (CO). Sebelum pembersihan *converter*, sensor MQ-2 menunjukkan tegangan keluaran sebesar 2,8 V, yang merepresentasikan konsentrasi gas CO relatif tinggi sebagai hasil dari pembakaran yang belum optimal. Setelah pembersihan *converter*, tegangan keluaran sensor menurun menjadi 1,2 V. Penurunan ini mengindikasikan berkurangnya konsentrasi gas CO dalam gas buang, sehingga kualitas udara hasil pembakaran menjadi lebih baik dan lebih ramah terhadap lingkungan. Secara keseluruhan, hasil evaluasi menunjukkan bahwa pembersihan *converter* memberikan dampak positif yang signifikan terhadap kinerja *incinerator*, baik dari sisi efisiensi termal maupun kualitas emisi gas buang. Dengan suhu pembakaran yang lebih tinggi, waktu pemanasan yang lebih singkat, serta penurunan konsentrasi gas CO, sistem incinerator pasca-pembersihan dapat dikatakan bekerja lebih optimal, efisien, dan memenuhi aspek keselamatan serta lingkungan yang lebih baik.

### 3.6 Analisis Perbandingan dengan Sistem Konvensional

Untuk memperkuat hasil, dilakukan perbandingan antara sistem yang dikembangkan dengan *incinerator* konvensional yang tidak dilengkapi fitur IoT. Hasil perbandingan disajikan pada Tabel 1.

**Tabel 3.** Hasil Perbandingan

| Parameter            | Sistem Konvensional                | Sistem IoT yang Dikembangkan        |
|----------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| Metode pemantauan    | Visual manual                      | Sensor otomatis & aplikasi Firebase |
| Akurasi suhu         | $\pm 20^{\circ}\text{C}$           | $\pm 2,3^{\circ}\text{C}$           |
| Efisiensi pembakaran | 78%                                | 92%                                 |
| Waktu respon suhu    | $\pm 20$ detik                     | $\pm 3$ detik                       |
| Keamanan operator    | Risiko tinggi (paparan asap/panas) | Aman (pemantauan jarak jauh)        |
| Penghematan energi   | Tidak tersedia                     | Menghasilkan daya 7-8 Watt dari TEG |

Dari data tersebut dapat disimpulkan bahwa sistem monitoring berbasis IoT memberikan peningkatan signifikan dalam efisiensi dan keamanan. Selain itu, integrasi sensor suhu dan gas menghasilkan data yang lebih presisi, yang dapat digunakan untuk pengambilan keputusan berbasis data. Perbandingan antara *incinerator* konvensional dan sistem *incinerator* berbasis IoT yang dikembangkan menunjukkan peningkatan kinerja yang signifikan pada berbagai aspek operasional, keselamatan, dan efisiensi energi. Pada sistem konvensional, metode pemantauan masih mengandalkan observasi visual manual yang rentan terhadap kesalahan manusia (*human error*), keterlambatan deteksi anomali, serta keterbatasan pencatatan data historis. Sebaliknya, sistem berbasis IoT memanfaatkan sensor suhu dan gas yang terintegrasi dengan platform *Firebase*, sehingga memungkinkan pemantauan *real-time*, pencatatan data otomatis, serta analisis tren operasional secara berkelanjutan. Dari sisi akurasi, deviasi pengukuran suhu yang semula mencapai  $\pm 20^{\circ}\text{C}$  pada sistem konvensional berhasil ditekan hingga  $\pm 2,3^{\circ}\text{C}$ , menghasilkan kontrol proses pembakaran yang jauh lebih stabil dan optimal. Hal ini berdampak langsung pada peningkatan efisiensi pembakaran dari 78% menjadi 92%, yang menunjukkan bahwa proses oksidasi limbah berlangsung lebih sempurna, mengurangi residu, serta menekan emisi gas berbahaya.

Selain itu, waktu respons suhu yang menurun drastis dari  $\pm 20$  detik menjadi  $\pm 3$  detik memungkinkan sistem melakukan penyesuaian parameter operasional secara cepat, sehingga mencegah overheating maupun pembakaran tidak sempurna. Dari perspektif keselamatan kerja, sistem konvensional memiliki risiko tinggi akibat paparan langsung operator terhadap panas ekstrem dan asap beracun, sedangkan sistem IoT memungkinkan pemantauan jarak jauh yang secara signifikan meningkatkan keselamatan dan kenyamanan operator. Keunggulan lain yang tidak dimiliki sistem konvensional adalah kemampuan pemanfaatan energi panas buang melalui modul *Thermoelectric Generator* (TEG) yang mampu menghasilkan daya listrik sebesar 7–8 Watt. Energi ini dapat dimanfaatkan untuk mendukung kebutuhan daya sensor atau sistem monitoring, sehingga menciptakan konsep sistem mandiri energi (*self-powered monitoring system*). Secara keseluruhan, integrasi teknologi IoT tidak hanya meningkatkan efisiensi operasional dan akurasi data, tetapi juga mendukung pengambilan keputusan berbasis data (*data-driven decision making*), peningkatan standar keselamatan kerja, serta penerapan prinsip keberlanjutan energi dalam pengelolaan limbah.

### 3.7 Integrasi dengan Konsep *Smart Environment*

Penerapan sistem monitoring ini memiliki relevansi yang kuat dengan konsep *Smart Environment*, yang merupakan salah satu pilar utama dalam pengembangan *Smart City*. *Smart Environment* menekankan pemanfaatan teknologi informasi dan komunikasi untuk mengelola sumber daya lingkungan secara efisien, berkelanjutan, dan berbasis data. Melalui sistem monitoring berbasis *Internet of Things* (IoT) yang terintegrasi dengan platform penyimpanan data seperti *Firebase*, proses pemantauan kinerja *incinerator* dapat dilakukan secara *real-time* dan jarak jauh. Hal ini memungkinkan pemerintah daerah, pengelola fasilitas, maupun instansi terkait untuk melakukan pengawasan dan evaluasi kinerja alat secara berkelanjutan tanpa harus melakukan inspeksi fisik secara rutin, sehingga dapat menghemat waktu, biaya operasional, dan sumber daya manusia. Selain fungsi pemantauan, data historis yang tersimpan secara terstruktur di *Firebase* juga memiliki nilai strategis sebagai basis analisis lanjutan. Data tersebut dapat dimanfaatkan untuk melakukan analisis prediktif, seperti memperkirakan waktu optimal untuk pembersihan *converter*, memprediksi penurunan performa sistem pembakaran, serta mendeteksi potensi kerusakan komponen sejak dini sebelum terjadi kegagalan yang lebih serius. Dengan adanya kemampuan prediksi ini, pengelolaan *incinerator* dapat beralih dari pendekatan reaktif menjadi preventif dan proaktif, sehingga tingkat keandalan sistem meningkat dan risiko gangguan operasional dapat diminimalkan.

Di sisi lain, penerapan sistem *monitoring* ini juga memberikan kontribusi nyata terhadap pengurangan emisi karbon dan polutan udara. Dengan memastikan bahwa proses pembakaran berlangsung secara optimal dan suhu pembakaran tetap berada pada rentang yang ideal, sistem dapat menekan pembentukan gas berbahaya seperti karbon monoksida (CO) dan metana (CH<sub>4</sub>) yang berpotensi mencemari udara serta mempercepat pemanasan

global. Pengendalian suhu dan parameter pembakaran yang akurat juga membantu meningkatkan efisiensi proses termal, sehingga limbah dapat dimusnahkan dengan lebih efektif dan ramah lingkungan.

Secara keseluruhan, sistem monitoring ini sejalan dengan prinsip teknologi hijau (*green technology*) yang bertujuan menciptakan keseimbangan antara pemenuhan kebutuhan energi, pengelolaan limbah, dan kelestarian lingkungan. Integrasi teknologi digital, analisis data, dan otomatisasi dalam sistem *incinerator* tidak hanya mendukung pengurangan dampak lingkungan, tetapi juga memperkuat upaya menuju pembangunan kota yang cerdas, berkelanjutan, dan berwawasan lingkungan.

### 3.8 Diskusi Hasil dan Implikasi Penelitian

Keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa sistem *monitoring* berbasis *Internet of Things* (IoT) yang dikembangkan telah berhasil memenuhi tujuan utama penelitian, yaitu memantau dan mengoptimalkan proses pembakaran serta menjaga kebersihan dan kinerja *converter* pada *incinerator*. Sistem mampu bekerja secara *real-time* dalam mengumpulkan, mengolah, dan mengirimkan data kondisi operasional *incinerator*, sehingga memberikan informasi yang akurat dan berkelanjutan kepada pengguna. Hal ini membuktikan bahwa pendekatan digital melalui IoT dapat meningkatkan efisiensi, keamanan, dan keandalan sistem pengolahan limbah berbasis pembakaran.

Penggunaan sensor *Thermocouple* terbukti efektif dalam mendeteksi dan memantau perubahan suhu ruang bakar *incinerator* secara presisi, sehingga *operator* dapat memastikan proses pembakaran berlangsung pada rentang suhu optimal. Sementara itu, sensor gas MQ-2 mampu mendeteksi keberadaan gas hasil pembakaran secara konsisten, yang berperan penting dalam mengidentifikasi potensi emisi berbahaya serta menjaga kualitas proses pembakaran. Integrasi kedua sensor tersebut menghasilkan sistem monitoring yang komprehensif, karena mampu menggabungkan parameter suhu dan gas sebagai indikator utama performa *incinerator*.

Dari sisi komunikasi data, pemanfaatan *platform Firebase* sebagai media penyimpanan dan sinkronisasi data terbukti memberikan solusi yang andal, efisien, dan mudah diakses. Data hasil pembacaan sensor dapat dikirimkan secara *real-time* ke *database cloud* dan ditampilkan melalui antarmuka aplikasi, sehingga memudahkan proses pemantauan jarak jauh. Dengan adanya sistem ini, ketergantungan terhadap pengawasan manual dapat diminimalkan, sekaligus meningkatkan kecepatan pengambilan keputusan apabila terjadi kondisi tidak normal pada *incinerator*.

Nilai tambah dari penelitian ini terletak pada potensi implementasinya yang luas di berbagai sektor. Sistem pemantauan IoT ini dapat diterapkan pada pengelolaan limbah rumah sakit untuk memastikan proses pemusnahan limbah medis berjalan aman dan sesuai standar lingkungan. Selain itu, sistem juga relevan untuk industri makanan, kawasan industri, serta area perkotaan yang memerlukan sistem pengolahan sampah terintegrasi dan berkelanjutan. Fleksibilitas desain sistem memungkinkan penyesuaian terhadap skala dan kebutuhan operasional yang berbeda-beda. Lebih lanjut, sistem yang dikembangkan masih memiliki peluang pengembangan di masa mendatang. Penambahan fitur berbasis *machine learning* dapat digunakan untuk menganalisis pola dan tren suhu maupun emisi gas secara historis. Dengan pendekatan tersebut, sistem dapat menghasilkan peringatan dini (*early warning system*) terhadap potensi kegagalan alat, penurunan efisiensi pembakaran, atau peningkatan emisi yang tidak diinginkan. Pengembangan ini diharapkan mampu meningkatkan aspek prediktif dan preventif dalam pengelolaan *incinerator*. Hasil penelitian ini juga menunjukkan bahwa kolaborasi multidisiplin antara bidang teknik elektro, informatika, dan ilmu lingkungan mampu menghasilkan inovasi teknologi yang aplikatif dan memberikan manfaat nyata bagi masyarakat. Sistem *monitoring* yang dibangun tidak hanya berfungsi sebagai alat pengawasan, tetapi juga menjadi langkah awal dalam mengubah paradigma pengelolaan sampah dari proses manual dan konvensional menuju sistem otomatis yang terintegrasi secara digital, cerdas, dan berorientasi pada keberlanjutan lingkungan.

## 4. KESIMPULAN

Sistem monitoring berbasis IoT pada *incinerator* sampah berhasil dikembangkan menggunakan sensor *Thermocouple* tipe K dan MQ-2 yang terintegrasi dengan mikrokontroler Arduino Uno R3 serta platform *Firebase*. Sensor *Thermocouple* mencatat suhu pembakaran hingga 998°C dengan deviasi rata-rata  $\pm 2,3^\circ\text{C}$ , sedangkan sensor MQ-2 mendeteksi konsentrasi gas CO dengan tegangan keluaran 0,5–1,2V pada kondisi pembakaran optimal dan meningkat hingga 3,7V saat pembakaran tidak sempurna, dengan ambang batas kebersihan *converter* ditetapkan pada 1,5V. Pengujian *Firebase* menunjukkan waktu pengiriman data rata-rata 0,8 detik pada jaringan stabil dengan kemampuan pemulihan koneksi kurang dari 5 detik. Pembersihan *converter* meningkatkan suhu maksimum dari 870°C menjadi 998°C, mempersingkat waktu pemanasan dari 14 menjadi 10 menit, serta menurunkan tegangan sensor MQ-2 dari 2,8V menjadi 1,2V. Modul TEG menghasilkan daya rata-rata 7,8 Watt yang cukup untuk menyuplai komponen sistem secara mandiri. Dibandingkan sistem konvensional, efisiensi



pembakaran meningkat dari 78% menjadi 92% dengan waktu respons suhu  $\pm 3$  detik, sehingga sistem ini terbukti lebih akurat, efisien, aman, dan berpotensi dikembangkan untuk pengelolaan limbah yang modern dan berkelanjutan.

## REFERENSI

- [1] "Electricity Generation by Waste Material," *Pap. Publ.*, 2025.
- [2] "Experimental Modelling of Grid-tied Thermoelectric Generator from Incinerator Waste Heat," *Smart Grid Clean Energy*, 2021.
- [3] K. Chaarmart and A. Mameekul, "Application of Thermoelectric Generator in Incinerator," *JMSAE\_CEA*, 2019.
- [4] "A Review of Thermoelectric Generators for Waste Heat Recovery," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2023.
- [5] A. Mardiyanto, "Analisis Kinerja Insinerator Menggunakan Sistem Monitoring Suhu dan Gas Buang," vol. 25, no. 1, pp. 65–74, 2025.
- [6] "Fault Monitoring Method of Domestic Waste Incineration," *Heliyon*, 2024.
- [7] M. Sarosa, S. Wirayoga, R. I. Putri, and S. Adhisuwignjo, "Waste incinerator monitoring system based on remote communication with android interface," vol. 14, no. 1, pp. 136–144, 2025, doi: 10.11591/ijres.v14.i1.pp136-144.
- [8] P. Fernández-Yáñez, V. Romero, O. Armas, and G. Cerretti, "Thermal Management of Thermoelectric Generators for Waste Energy Recovery," *Appl. Therm. Eng.*, 2021, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2021.116961.
- [9] A. G. Permana and others, "Integrated Waste Management System with IoT-based Monitoring," 2023.
- [10] J. A. Ananda, S. Rahono, and R. E. Rachmanita, "Studi Sistem Konversi Panas Buang Konduksi Berbasis Termoelektrik Generator," vol. 2, no. September, 2020.
- [11] D. Shin and others, "Intelligent Combustion Control in Waste-to-Energy Facilities," *Energies*, 2024.
- [12] J. M. Kadang and N. Sinaga, "Pengembangan Teknologi Konversi Sampah Untuk Efektifitas Pengolahan Sampah dan Energi Berkelanjutan," vol. 15, no. x, pp. 33–44, 2020.
- [13] "Thermal Management Systems and Waste Heat Recycling by Thermoelectric Devices," *Energies*, 2021.
- [14] T. B. E. P, S. P, K. S, and A. K, "IoT based air quality measurement and alert system for steel, material and copper processing industries," *Int. Virtual Conf. Sustain. Mater.*, vol. 81, no. 2, pp. 127–132, 2023, [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785321018496>
- [15] "Exhaust Waste Heat Recovery System Using Thermoelectric Generator," *Int. J. Low-Carbon Technol.*, 2024, doi: 10.1093/ijlct/ctae249.
- [16] "Development of a High-Capacity Portable Biomass-Combustion-Powered Thermoelectric Generator," 2022.
- [17] "A Thermoelectric Generator Systems for Waste Heat Recovery: A Review," *Int. J. Eng. Res. Technol.*, 2020.
- [18] G. Konstantinou, T. Kyratsi, and L. S. Louca, "Design of a Thermoelectric Device for Power Generation Combustion Engines," *Energies*, vol. 15, no. 11, pp. 2–16, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/en15114075>.
- [19] V. Kumar, V. Rampur, N. M. Jyothi, V. Tripathi, T. Bhaskar, and K. B. Glory, "Measurement : Sensors IOT sensor-based pollution management control technique," *Meas. Sensors*, vol. 24, no. August, p. 100513, 2022, doi: 10.1016/j.measen.2022.100513.
- [20] V. H. Juárez-Huerta, N. Sánchez-Sala, and d J. C. Chimal-Eguía, "Optimization Criteria and Efficiency of a Thermoelectric Generator," *Entropy*, vol. 24, no. 11, pp. 1–11, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/e24121812>.

