

Analisis Kinerja Insinerator Menggunakan Sistem Monitoring Suhu dan Gas Buang

Gunawan^{1,*}, Supardin², Idwar¹, Rahmawati¹, Arief Mardiyanto¹

¹Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Lhokseumawe

²Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Lhokseumawe

Jln. B. Aceh Medan Km.280 Buketrata 24301 INDONESIA

*E-mail: gunawan.samin@gmail.com

Abstract

Article history:

Received: 29-03-2025

Accepted: 14-04-2025

Published: 25-04-2025

Keywords:

gas buang,
insinerator,
sampah,
suhu, TPA.

Waste management is a challenge because landfills are almost full. Incineration is a vital solution in waste management because it can significantly reduce waste volume and eliminate hazardous substances through a high-temperature combustion process of at least 600 °C, thereby helping to reduce waste accumulation in landfills and its impact on the environment. Monitoring temperature and exhaust gas is essential to ensure combustion efficiency and maintain emissions within safe limits. This study aims to design and implement an accurate real-time monitoring system to support incinerator management to be more efficient and environmentally friendly. Temperature monitoring uses a thermocouple sensor and the MAX6675 module, exhaust gas emissions use MQ7 and MQ135 sensors to detect CO and CO₂. The thermocouple sensor used has an accuracy level of 99.23%, while exhaust gas monitoring uses an MQ-135 sensor to measure CO₂ with an accuracy of 98.93 % and an MQ-7 sensor for CO with an accuracy of 92.14 %. No-load incinerator temperature testing showed a peak temperature of 323 °C, which then decreased due to fuel depletion. Testing with waste load showed the temperature increased more slowly but reached a higher peak of 616 °C. During the combustion process, CO content increased to 150 ppm during incomplete combustion, while CO₂ peaked at 6,000 ppm and then decreased as complete combustion progressed. Future expectations require improvements in air flow regulation and the application of a scrubbing system to optimize combustion and reduce emissions.

1. Pendahuluan

Pengelolaan sampah menjadi tantangan di banyak kota, sehingga diperlukan teknologi efisien dan ramah lingkungan. Pembuangan dan pengelolaan sampah yang tidak tepat menyebabkan pencemaran lingkungan dan berdampak negatif pada kesehatan. Banyak tempat pemrosesan akhir (TPA) di Indonesia sudah hampir penuh, membuat pengelolaan sampah semakin sulit. Salah satu solusi yang efektif adalah pengolahan limbah secara termal (insinerator). Insinerator adalah salah satu metode yang umum digunakan untuk membakar limbah pada suhu tinggi [1]. Metode ini diutamakan karena dapat mengurangi volume sampah sehingga membutuhkan area yang lebih kecil dibandingkan TPA [2].

Insinerator dan peuyeumisasi sama-sama berfokus pada pengelolaan limbah sampah. Biobriket yang dihasilkan dari proses peuyeumisasi sampah pasar memiliki potensi sebagai bahan bakar alternatif [3], sementara panas yang dihasilkan dari insinerator juga dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi.

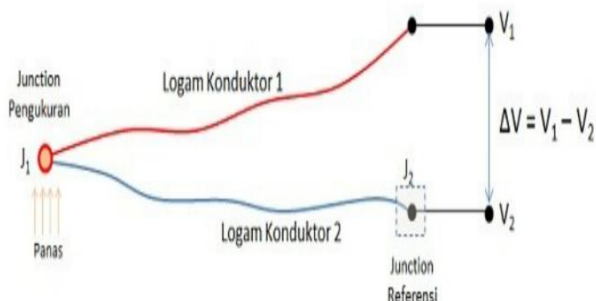
Sampah kota dengan pemanfaatan bahan aditif dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar alternatif. Briket dengan nilai kalor yang lebih tinggi dapat meningkatkan efisiensi pembakaran dalam insinerator, sehingga berpengaruh terhadap suhu operasi serta karakteristik gas buang yang dihasilkan [4].

Alat pembakar sampah (insinerator) menggunakan tungku burner sebagai sistem pembakaran dengan bahan bakar limbah oli bekas dan air. Temperatur tertinggi didalam ruang pembakaran 480 °C untuk sampah plastik kering dengan efisiensi alat insinerator 90,68 % [5]. Pengolahan limbah padat medis menggunakan insinerator yang dikontrol aliran udara, memungkinkan efisiensi yang lebih tinggi dalam proses pembakaran dan meminimalkan dampak lingkungan. Dengan memanfaatkan aliran udara alami, sistem ini juga berkontribusi pada pengurangan emisi gas berbahaya yang dihasilkan selama proses pembakaran [6]. Sensor *proximity* yang berisi termokopel sebagai umpan balik sistem kendali fuzzy dapat membuat sistem memonitor suhu dan juga

mengendalikan kecepatan motor *blower* untuk pengaturan suhu ruangan *burner* insinerator [7].

Suhu yang optimal dalam proses insinerasi sangat penting untuk mencapai efisiensi pembakaran yang maksimal. Suhu tinggi diperlukan untuk memastikan pembakaran yang efisien menghasilkan emisi gas yang lebih bersih dan meningkatkan pengurangan volume sampah menjadi abu. Secara umum, suhu optimal dalam proses insinerasi adalah 600°C hingga 1000°C. Suhu tinggi diperlukan untuk memastikan pembakaran yang efisien, menghasilkan emisi gas yang lebih bersih [8]. Namun, suhu yang terlalu tinggi dapat menyebabkan kerusakan peralatan. Tungku pembakaran adalah komponen utama insinerator, dan pengendalian suhunya sangat penting untuk mengurangi emisi. Pengendali suhu tipe T2N4S-14R bekerja dengan dua posisi, membuka dan menutup aliran gas melalui *relay* yang diatur oleh solenoida. Ketika suhu mencapai *setpoint*, aliran gas akan ditutup secara otomatis terdeteksi [9]. Pengendalian suhu diperlukan untuk memastikan pembakaran berjalan aman, menggunakan pengontrol suhu dua posisi dengan komponen seperti termokopel, MAX6675, *burner*, *blower*, *Arduino*, dan laptop [10]. Pengontrol ini menjaga suhu di ruang bakar pada *setpoint* 630 °C dan 850 °C.

Thermocouple adalah titik temu antara dua logam dengan jenis berbeda (*junction*) menghasilkan tegangan (dalam unit millivolt) sebanding dengan suhu yang dirasakan di titik pertemuan kedua logam tersebut. Tegangan listrik dalam millivolt diukur di ujung logam yang tidak bertemu. Semakin tinggi suhu di *junction* maka semakin tinggi tegangan yang dapat diukur di ujung lainnya. Cara kerja termokopel ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Cara kerja sensor suhu thermocouple

Jika *thermocouple* dipanaskan maka akan terjadi beda potensial. Beda potensial yang dihasilkan sebanding dengan suhu panas yang

diterima *thermocouple* atau V1-V2. *Thermocouple* kemudian dihubungkan dengan kontroler dan display untuk membaca suhu yang diukur.

MAX6675 dapat mengukur suhu dalam rentang 0 °C hingga +1024 °C dengan akurasi ±3 °C. Nilai yang paling kecil adalah 0 yang menjadi representasi dari 0 °C dan nilai digital terbesarnya adalah 4095 yang menjadi representasi dari 1024°C. Sehingga rumus hubungan antara temperatur dengan nilai digital dijabarkan oleh persamaan 1.

$$\text{Suhu} = 1024 \times \frac{\text{Nilaidigital}}{4095} \quad (1)$$

Kompensator MAX6675 menerima sinyal analog dari termokopel tipe K, lalu mengubahnya menjadi sinyal digital sehingga dapat diproses oleh mikrokontroler. IC MAX6675 mencakup konverter analog-digital (ADC) 12-bit, yang berarti IC memiliki ketelitian (menampilkan data dengan besar perubahan suhu 0,25 °C, resolusi 12-bit).

Beberapa penelitian sebelumnya telah dilakukan untuk memantau parameter suhu dan emisi gas pada sistem insinerator. Insinerator limbah medis dengan sistem kontrol aliran udara alami telah dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi pembakaran dan mengurangi emisi gas buang [6]. Sistem monitoring suhu berbasis HMI untuk sistem burner portabel otomatis menggunakan perangkat *Programmable Logic Controller (PLC)* dioperasikan secara otomatis melalui panel kontrol dan dilengkapi dengan sistem monitoring berbasis *Human Machine Interface (HMI)*, yang berfungsi untuk memantau proses kerja sistem burner insinerator, kecepatan motor, serta suhu di dalam ruang bakar [7]. Sementara itu, pengendali dua posisi berbasis solenoida telah diterapkan untuk menjaga kestabilan suhu pada insinerator unggun tetap [9].

Proses pembakaran sampah pada insinerator mengubah sampah menjadi gas buang seperti CO₂. Gas beracun dari pembakaran sampah berdampak negatif pada lingkungan dan kesehatan. Sistem monitoring gas buang penting untuk mendeteksi peningkatan emisi secara dini, menjaga emisi dalam batas yang ditetapkan, dan memberi alarm kepada operator jika kondisi tidak sesuai. Proses pembakaran yang tidak sempurna menghasilkan gas sampingan yang

sulit dipantau melalui cerobong asap. Analisis gas buang seperti NO, SO_x, dan CO₂ penting untuk mengendalikan kelebihan udara dalam sistem pembakaran dan memastikan emisi sesuai batas yang ditentukan. Pengukuran gas buang dilakukan dari cerobong insinerator pada jarak 150–200 meter menggunakan metode penginderaan jauh [11].

Sebagian besar penelitian sebelumnya masih terbatas pada aspek kontrol suhu atau sistem pembakaran saja, tanpa mengintegrasikan pemantauan suhu dan gas buang secara *real-time* dalam satu sistem berbasis mikrokontroler yang ekonomis dan mudah dioperasikan. Penelitian ini menawarkan kebaruan dengan mengembangkan sistem monitoring suhu dan emisi gas buang yang terintegrasi secara *real-time* serta diuji secara langsung pada sistem insinerasi berbasis oli bekas dan air. Sistem ini tidak hanya mampu menampilkan data secara langsung melalui LCD, tetapi juga menyediakan informasi penting yang dapat digunakan sebagai dasar dalam pengambilan keputusan untuk optimalisasi efisiensi pembakaran dan pengendalian emisi gas buang.

Dengan pemantauan kontinyu, sistem memastikan emisi tetap dalam batas yang ditetapkan. Oleh karena itu, pemantauan suhu dan emisi gas buang yang tepat sangat penting untuk memastikan efisiensi operasional dan kepatuhan terhadap standar lingkungan. Pemantauan yang konsisten, maka potensi masalah dapat diidentifikasi lebih awal, memungkinkan tindakan pencegahan yang cepat. Selain itu, data yang diperoleh dari pemantauan ini dapat digunakan untuk meningkatkan desain dan operasi insinerator di masa mendatang. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem monitoring suhu dan emisi gas buang pada insinerator secara *real-time* berbasis mikrokontroler, guna mendukung efisiensi proses pembakaran dan memastikan emisi tetap berada dalam batas aman sesuai standar lingkungan. Sistem ini dirancang agar mampu memberikan data yang akurat dan berkelanjutan terhadap suhu ruang bakar serta kadar gas CO dan CO₂, sehingga dapat digunakan sebagai dasar evaluasi kinerja insinerator dan pertimbangan dalam pengambilan keputusan teknis untuk perbaikan dan pengembangan sistem insinerasi yang lebih ramah lingkungan.

Sistem monitoring memainkan peran penting dalam mengawasi kinerja insinerator. Diharapkan penggunaan insinerator ini mampu mengurangi polusi udara yang dihasilkan selama proses insinerasi sampah sampai di bawah baku mutu yang ditetapkan dan mudah dalam pengoperasiannya. Pengembangan dilakukan melalui inovasi instrumentasi dan sistem monitoring kontinyu berbasis pengendali mikrokontroler.

2. Metode

Penelitian ini dilakukan dengan metode eksperimen (percobaan) untuk menganalisis kinerja insinerator berdasarkan parameter suhu dan emisi gas buang. Pengujian sensor dilakukan dengan membandingkan hasil pengukuran sensor dengan alat ukur pembanding. Persamaan 2 digunakan untuk menghitung tingkat akurasi sensor:

$$E = \left| \frac{X_{\text{sensor}} - X_{\text{referensi}}}{X_{\text{referensi}}} \right| \times 100\% \quad (2)$$

Dimana E adalah error atau deviasi sensor (%), X_{sensor} adalah hasil pengukuran sensor, $X_{\text{referensi}}$ adalah hasil pengukuran alat ukur pembanding.

Suhu dalam *primary chamber* berkisar antara 600-800°C. Untuk mencapai suhu tersebut, pemanasan dalam *chamber* dibantu oleh *burner* dan energi pembakaran limbah tersebut. Sensor suhu dan gas dikalibrasi menggunakan standar referensi sebelum digunakan. Suhu insinerator diuji dalam kondisi standar tanpa beban dan dengan beban sampah. Pengujian gas buang (konsentrasi CO dan CO₂) insinerator dilakukan pada saat pembakaran sampah.

Monitoring suhu insinerator menggunakan modul MAX6675 dan sensor *thermocouple*. Komponen utama monitoring emisi gas buang adalah sensor MQ7 dan MQ135 untuk pengukuran CO dan CO₂. Perancangan sistem skala dilakukan untuk mengubah hasil pembacaan sensor menjadi data yang ditampilkan pada LCD secara *real-time* menggunakan Arduino Uno sebagai pengendali.

Sistem monitoring suhu menggunakan sensor *thermocouple type-K* dan Arduino uno. *Thermocouple type-K* berupa logam dengan cakupan suhu pengukuran adalah -200 ~ 1200 °C. Alat ini menggunakan modul MAX6675

yang digunakan untuk *cold & hot junction compensation* dan penguat tegangan *output thermocouple* tipe K. Penggunaan sensor *thermocouple* tipe K memungkinkan pengukuran suhu yang akurat dalam rentang suhu tinggi, menjadikannya ideal untuk aplikasi industri.

Integrasi sensor suhu *thermocouple* dengan Arduino Uno memungkinkan pemrosesan data secara *real-time*, sehingga pengguna dapat memantau perubahan suhu dengan lebih efisien. Penggunaan alat ukur dibutuhkan kalibrasi yaitu proses penentuan variabel yang menggambarkan fungsi alih dari sensor, transmitter, dan ADC. Rangkaian pengondisi sinyal menguatkan tegangan keluaran sensor menjadi 0-5V agar dapat dibaca oleh ADC mikrokontroler [12].

Untuk memperoleh nilai suhu dari termokopel, diperlukan sebuah rangkaian penguat khusus. Nilai suhu yang dihasilkan oleh penguat ini bergantung pada tegangan yang terdeteksi di sambungan referensi. Tegangan tersebut ditentukan oleh selisih suhu antara sambungan referensi dan sambungan pengukuran (sambungan panas). Oleh karena itu, informasi suhu pada sambungan referensi menjadi penting agar perhitungan suhu aktual yang diukur dapat dilakukan secara akurat. Penguat MAX6675 berkomunikasi dengan mikrokontroler menggunakan protokol SPI (*Serial Peripheral Interface*) dan menghasilkan *output* data dengan resolusi 12 bit. *Library* yang digunakan untuk mengukur suhu dari termometer tipe K dengan MAX6675 adalah *library max6675* dari Adafruit.

Monitoring gas buang meliputi pengukuran karbon monoksida (CO) dan karbon dioksida (CO₂) pada cerobong insinerator. Sensor MQ-135 mendeteksi tingkat kepadatan partikel karbon dioksida (CO₂) dan sensor MQ-7 mendeteksi tingkat kepadatan partikel karbon monoksida (CO) di lingkungan, lalu mengirim data dalam bentuk analog ke Arduino. Sensor MQ-7 dan MQ-135 terhubung dengan Arduino yaitu VCC, GND, AO. Pin VCC dihubungkan pada Pin 5V Arduino, pin GND dihubungkan pada pin GND Arduino.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Sensor Suhu

Sensor menghasilkan tegangan keluaran berbanding linear dengan suhu yaitu 41 μV/°C (data sheet). Termokopel tipe-K membutuhkan

supply tegangan +5 Volt. Sehingga hasil pembacaan data analog dapat dikonversikan ke suhu Celsius dengan persamaan 3.

$$V_{out} = (41\mu V / ^\circ C) \times 5 (T_r - T_{AMB}) \quad (3)$$

Dimana V_{out} adalah tegangan keluaran *thermocouple* (μVolt), T_r adalah suhu referensi junction (°C), dan T_{AMB} adalah suhu lingkungan (°C).

Untuk mengetahui keakuratan sensor *thermocouple* dalam mendeteksi suhu, maka perlu dilakukan kalibrasi dengan alat ukur temperatur lainnya. Sensor *thermocouple* dikalibrasi dengan termometer pembanding. Pengukuran suhu menggunakan sensor dibandingkan dengan termometer pembanding ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Pengujian sensor *thermocouple*

Pengukuran ke	Pengukuran suhu (°C)		Error (%)
	Alat Ukur	Pembanding	
1	31	31	0,00
2	51	50	1,96
3	74	75	1,35
4	99	100	1,01
5	124	125	0,81
6	136	135	0,74
7	144	145	0,69
8	155	155	0,00
9	164	165	0,61
10	174	175	0,57
Rata-rata error			0,77

Pengujian sensor *thermocouple* untuk mengetahui apakah sensor sudah dapat bekerja dengan baik dan benar dalam mendeteksi suhu. Sensor suhu *thermocouple* type K memiliki kepekaan yang baik terhadap temperatur. Sensor *thermocouple* disambungkan dengan modul *driver* MAX6675. Akurasi pengukuran sensor suhu sebesar 99,23 %. Korelasi antara alat ukur dan pembanding ditunjukkan pada persamaan 4.

$$y = 0.994x + 0.316 \quad (4)$$

$$R^2 = 0.9997$$

Dimana x adalah suhu pembanding (°C), dan y adalah suhu alat ukur (°C).

Koefisien determinasi (R^2) yang mendekati satu menandakan bahwa hubungan antara data sensor dan referensi sangat linier. Nilai slope sebesar 0,994 menunjukkan bahwa pembacaan sensor sangat mendekati nilai ideal, di mana setiap kenaikan 1 °C pada suhu referensi

menghasilkan pembacaan sekitar 0,994 °C oleh sensor. Temuan ini menunjukkan bahwa sensor *thermocouple* tipe-K yang digunakan bersama modul MAX6675 memiliki tingkat akurasi dan konsistensi yang sangat tinggi. Hasil ini sejalan dengan penelitian sebelumnya, melalui analisis regresi linier pada pembacaan amplifier *thermocouple* *Adafruit* MAX31856 menunjukkan tingkat stabilitas dan keakuratan pembacaan suhu yang tinggi pada sensor *thermocouple* tipe-K [13]. Oleh karena itu, sistem monitoring suhu yang dirancang dapat diandalkan untuk pengukuran suhu pada insinerator secara real-time.

3.2 Sensor Gas Buang

Pengujian sensor gas buang karbon dioksida dan karbon monoksida terlebih dahulu dilakukan pengukuran pada asap knalpot dan hasil pengukurannya ditunjukkan dalam Tabel 2 dan Tabel 3. Alat pembanding yang digunakan adalah *air quality detector* CO₂ *Xiaomi* dan *air detector CO smart sensor AS8700A*.

Tabel 2. Pengujian modul sensor MQ 135 (CO₂)

No	Lama pencemaran (detik)	Angka CO ₂ (ppm)		Error (%)
		Sensor MQ 135	Alat pembanding	
1	0	426	424	0,5
2	5	639	635	0,6
3	10	1210	1232	1,8
4	15	3572	3651	2,2
5	20	4680	4690	0,2
Rata-rata error (%)			1,07	

Tabel 3. Pengujian modul sensor MQ-7

No	Lama pencemaran (detik)	Angka CO (ppm)		Error (%)
		Sensor MQ 7	Alat pembanding	
1	0	1,04	1	3,85
2	5	2,20	2,5	13,64
3	10	16,55	18	8,76
4	15	17,37	19	9,38
5	20	21,22	22	3,68
Rata-rata error (%)			7,86	

Semakin lama waktu pemaparan udara tercemar maka kadar CO₂ meningkat. Kenaikan kadar CO₂ yang terus-menerus dapat berdampak negatif pada kesehatan manusia dan lingkungan, sehingga penting untuk memantau kualitas udara secara berkala. Dengan akurasi tinggi, pengguna dapat mengambil tindakan yang diperlukan untuk mengurangi paparan terhadap udara tercemar dan meningkatkan kualitas

udara di sekitar. Pengujian sensor gas buang selanjutnya adalah sensor MQ-7 untuk mengukur CO. Pembacaan CO (ppm) cenderung meningkat seiring dengan peningkatan durasi paparan terhadap udara yang tercemar.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor MQ-135 dan MQ-7 memiliki tingkat akurasi masing-masing sebesar 98,93% dan 92,14% dalam mendeteksi gas CO₂ dan CO. Hal ini selaras dengan temuan dalam penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa sistem pemantauan gas berbasis sensor serupa mampu mendeteksi kandungan CO dan CO₂ di lingkungan secara akurat, serta mengirimkan informasi secara *real-time* ketika konsentrasi gas melebihi ambang batas yang telah ditetapkan [14].

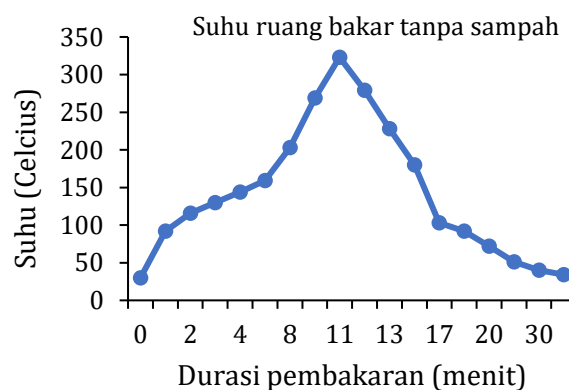
LCD digunakan untuk menampilkan hasil pembacaan dari sensor. LCD menggunakan komunikasi serial (I2C) sehingga lebih menghemat pin I/O yang digunakan. Terdapat 2 pin pada LCD I2C 16x2 yang dihubungkan pada Arduino yaitu pin SDA dan SCL. SDA dan SCL dihubungkan pada pin A4 dan A5 Arduino. Pin VCC dan GND Buzzer dihubungkan dengan pin 5V dan D4 Arduino.

3.3 Monitoring Suhu

Pengujian suhu insinerator dilakukan dengan cara pengujian tanpa beban dan beban sampah rumah tangga. Bahan bakar oli bekas sebanyak 0,5 liter dan air 1 liter.

3.3.1 Suhu Insinerator tanpa Beban Sampah

Pengujian suhu insinerator tanpa beban sampah ditunjukkan pada Gambar 2.



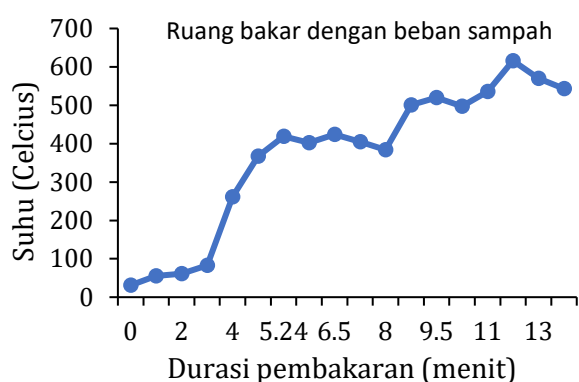
Gambar 2. Suhu insinerator tanpa beban

Air mendidih pada saat menit ke dua, dan menghasilkan steam pada menit ke lima. Antara menit ke-5 hingga menit ke-11, suhu meningkat

secara drastis, mencapai puncaknya pada 323°C pada menit ke-11. Ini adalah titik tertinggi dari percobaan, yang menandakan bahwa insinerator mencapai kondisi maksimal dalam pemanasan tanpa beban sampah. Selanjutnya suhu menurun ke 279°C pada menit ke-12 dan terus menurun hingga 228°C pada menit ke-13. Penurunan ini disebabkan oleh berkurangnya aliran bahan bakar, air pada boiler telah habis dan hilangnya panas karena tidak adanya beban sampah.

3.3.2 Suhu Insinerator dengan Beban Sampah

Hasil pengujian suhu insinerator dengan beban sampah ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Suhu insinerator dengan beban sampah

Dari menit ke-0 hingga menit ke-3, suhu meningkat dari 31 °C hingga 83 °C, yang menunjukkan pemanasan awal yang lebih lambat dibandingkan pengukuran tanpa beban. Sampah memerlukan waktu lebih untuk mulai terbakar karena kandungan air dan material yang relatif lembab. Pada menit ke-9, suhu bahkan mencapai 501 °C, dan puncaknya terjadi pada menit ke-11 dengan suhu 536 °C. Pada menit ke-12 mencapai 616 °C yang merupakan suhu tertinggi yang dicapai dalam pengujian ini.

Suhu awal dengan beban sampah meningkat lebih lambat dibandingkan tanpa beban, karena material sampah memiliki kelembapan yang lebih tinggi sehingga membutuhkan lebih banyak energi untuk memulai pembakaran. Dengan beban sampah, suhu meningkat lebih drastis dan mencapai puncak yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan percobaan tanpa beban. Ini karena bahan sampah menghasilkan panas tambahan selama proses pembakaran. Pengujian dengan beban sampah menghasilkan suhu puncak hampir dua kali lebih tinggi daripada tanpa

beban, menunjukkan adanya tambahan energi dari pembakaran sampah. Dengan beban sampah, fluktuasi suhu lebih dinamis karena sifat bahan bakar (sampah organik) yang terbakar secara bertahap, menciptakan variasi energi yang lebih besar dibandingkan dengan pengujian tanpa beban.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa suhu insinerator tanpa beban mampu mencapai 323 °C, sedangkan dengan beban sampah dapat meningkat hingga 616 °C. Hal ini menunjukkan bahwa pembakaran dengan beban menghasilkan panas tambahan yang signifikan akibat proses eksotermik dari pembakaran material organik. Karakteristik pembakaran sampah perkotaan dipengaruhi secara signifikan oleh kadar air, di mana kelembapan tinggi menyebabkan perlambatan peningkatan suhu awal insinerator akibat penyerapan energi termal untuk penguapan [15]. Pola serupa dengan penelitian ini, di mana suhu dengan beban sampah meningkat lebih lambat (31°C ke 83°C dalam 3 menit) dibandingkan tanpa beban (mencapai titik didih dalam 2 menit), namun kemudian melonjak drastis hingga 616°C setelah fase penguapan akibat pembakaran material kering.

Pembakaran sampah ditunjukkan pada Gambar 4. Insinerator menunjukkan kestabilan pada fase akhir pembakaran, dengan suhu yang tetap berada di atas 500 °C hingga akhir pengujian, menandakan bahwa sistem insinerator bekerja lebih efisien saat ada beban sampah yang terbakar.



Gambar 4. Pembakaran sampah (a) sampah yang dibakar; (b) proses terbakar; (c) sisa pembakaran

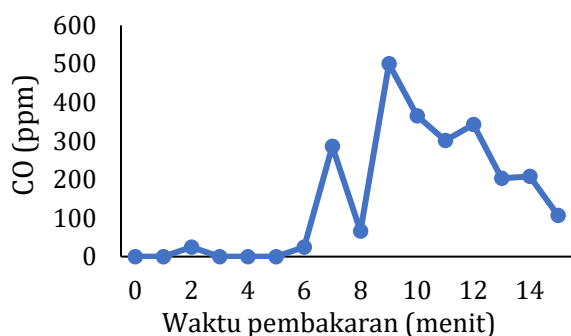
3.4 Pengujian Gas Buang Insinerator dengan Beban Sampah

Pengujian dilakukan menggunakan alat ukur gas buang untuk CO dan CO₂. CO dan CO₂ adalah gas tak berwarna, tak berbau, tak berasa, dan tidak mengiritasi, yang dihasilkan dari pembakaran gas, minyak, bensin, bahan bakar padat, atau kayu. CO₂ berbau sedikit tajam pada konsentrasi sangat tinggi (>50.000 ppm). CO

meningkat pada fase awal hingga menengah, menunjukkan bahwa pembakaran belum sempurna (terjadi pembentukan CO). CO₂ meningkat signifikan saat proses pembakaran berlangsung lebih sempurna, ditandai dengan suhu tinggi dan proses yang lebih stabil.

3.4.1 Perubahan Kandungan CO

Pengukuran gas buang CO selama proses pembakaran ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Gas buang (CO) insinerator proses pembakaran sampah

Kandungan CO tidak terdeteksi (0 ppm) selama 5 menit pertama, yang menandakan belum ada pembakaran yang tidak sempurna. Kandungan CO mulai terdeteksi sebesar 25 ppm, dan meningkat drastis hingga mencapai puncak 500 ppm pada menit ke-9. Ini mengindikasikan bahwa pembakaran tidak sempurna mulai terjadi, dapat terjadi karena kekurangan oksigen atau karena material yang sulit terbakar sempurna. Fenomena ini sejalan dengan temuan dalam studi pola sebaran emisi CO, NO_x, partikulat dan SO₂ dari sumber insinerator rumah sakit, yang menunjukkan bahwa aktivitas pembakaran limbah B3 pada insinerator rumah sakit menghasilkan emisi CO yang signifikan, terutama saat proses pembakaran tidak berlangsung secara optimal [16].

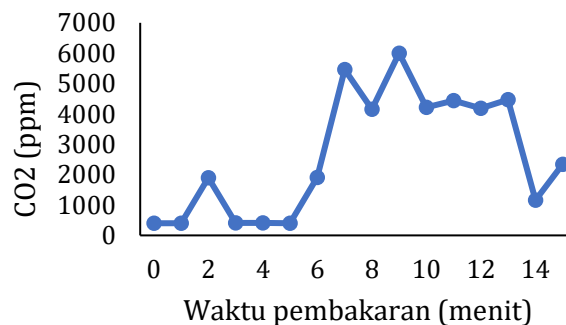
Selain itu, pentingnya teknologi penanganan emisi gas dari insinerator sampah kota untuk mengurangi emisi gas beracun seperti CO, dengan menggunakan sistem seperti *Quencher* dan *Spray Drying Absorption (SDA)* untuk mengendalikan laju pembentukan gas berbahaya setelah proses pembakaran [17].

Efisiensi alat yang ditunjukkan oleh kestabilan suhu di atas 500 °C pada fase akhir pembakaran mengindikasikan bahwa desain ruang bakar dan pengaturan udara telah cukup baik. Namun, lonjakan kadar CO hingga 500 ppm menunjukkan bahwa masih diperlukan perbaikan, khususnya dalam hal distribusi udara

atau dengan menambahkan sistem pembakaran sekunder untuk memastikan tercapainya proses pembakaran yang sempurna untuk insinerator modern [8,18].

3.4.2 Perubahan Kandungan CO₂

Pengukuran gas buang CO₂ selama proses pembakaran ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Gas buang (CO₂) insinerator proses pembakaran sampah

Kandungan CO₂ pada fase awal relatif stabil di sekitar 400-410 ppm menunjukkan sampah belum terbakar secara signifikan, sehingga emisi CO₂ masih rendah. Selanjutnya kandungan CO₂ meningkat drastis hingga 6.000 ppm, menunjukkan pembakaran yang lebih intens dengan pelepasan karbon dioksida dari pembakaran material organik. Kadar CO₂ selama proses pembakaran mencapai 6.000 ppm, yang masuk dalam kategori berbahaya. Ini menunjukkan bahwa konsentrasi CO₂ yang tinggi ini perlu ditangani untuk mencegah dampak negatif. Untuk itu perlu dilanjutkan dilakukan modifikasi insinerator.

Hasil analisis menunjukkan bahwa kandungan CO₂ meningkat drastis hingga 6.000 ppm selama proses pembakaran, yang menunjukkan intensitas pembakaran tinggi namun juga menimbulkan potensi risiko terhadap lingkungan dan kesehatan. Hasil ini sejalan dengan studi efektivitas insinerator terhadap pengolahan limbah padat medis yang menunjukkan bahwa beberapa insinerator tidak memenuhi spesifikasi teknis dalam pengendalian emisi gas buang, termasuk CO₂, sehingga diperlukan modifikasi dan peningkatan sistem insinerator agar emisi tetap berada dalam batas aman [19].

Pada awal pembakaran, emisi CO₂ dan CO rendah, menandakan belum ada aktivitas pembakaran yang signifikan. Setelah beberapa menit, pembakaran mulai aktif, menyebabkan

lonjakan emisi CO₂ dan CO serta peningkatan suhu. Peningkatan suhu dan pasokan udara yang memadai dapat membantu mencapai pembakaran yang lebih sempurna, mengurangi emisi CO dan meningkatkan pelepasan emisi CO₂ [20]. Modifikasi insinerator diperlukan untuk meningkatkan efisiensi pembakaran dan mengurangi emisi gas buang. Beberapa metode dan teknologi tambahan yang dapat dipertimbangkan antara lain penggunaan pembakaran sekunder untuk memastikan bahwa seluruh gas berbahaya, seperti CO, terbakar sepenuhnya pada suhu tinggi, serta penerapan teknik *scrubbing* untuk mengurangi polutan dalam gas buang sebelum dilepaskan ke atmosfer.

Insinerator ini menggunakan oli bekas dan air sebagai sumber energi untuk proses pembakaran sampah. Pemanfaatan oli bekas yang telah melalui proses filtrasi dan pemurnian terbukti dapat meningkatkan efisiensi pembakaran serta mengurangi emisi gas buang yang berbahaya [21]. Oleh karena itu, penggunaan oli hasil pemisahan tersebut dalam insinerator berpotensi menghasilkan proses pembakaran yang lebih bersih dan efisien.

Batas aman gas karbon dioksida (CO₂), berada pada <5.000 ppm, untuk batas berbahaya berada pada 5.000 - 40.000 ppm, dan batas mematikan >40.000 ppm [22]. Dampak emisi gas buang implementasi insinerator terhadap lingkungan sebaiknya dilakukan kajian *Life Cycle Assesment (LCA)* untuk menilai potensi dampak lingkungan sepanjang siklus hidupnya [23,24].

Teknologi pengendalian polusi, harus dikembangkan sehingga insinerasi sampah kota akan lebih menarik karena efisiensinya yang tinggi dan ramah lingkungan. Selain itu, perlu kajian aspek ekonomi dari potensi insinerator sebagai sumber energi karena dapat menghasilkan panas dengan suhu tinggi [25].

Hasil penelitian ini tidak hanya konsisten dengan temuan-temuan sebelumnya, tetapi juga menunjukkan peningkatan performa melalui integrasi sistem monitoring *real-time* yang memungkinkan evaluasi langsung terhadap performa insinerator dan dampak lingkungannya. Dengan demikian, sistem monitoring ini tidak hanya mendukung pengoperasian insinerator secara efisien, tetapi juga memberikan dasar yang kuat untuk pengambilan keputusan teknis dalam perbaikan dan pengembangan insinerator yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan.

4. Kesimpulan

Penelitian ini merancang dan mengimplementasikan sistem monitoring suhu dan emisi gas buang insinerator berbasis mikrokontroler Arduino, yang mengintegrasikan sensor *thermocouple* tipe-K, MAX6675, MQ-135, dan MQ-7. Sistem ini mampu memberikan pembacaan suhu dan emisi CO₂ serta CO secara akurat, dengan tingkat akurasi masing-masing 99,23%, 98,93%, dan 92,14%.

Pengujian menunjukkan bahwa suhu insinerator meningkat dari 323 °C tanpa beban menjadi 616 °C dengan beban sampah, akibat reaksi eksotermik material organik. Emisi gas buang CO meningkat saat pembakaran tidak sempurna, sedangkan CO₂ meningkat saat pembakaran berlangsung optimal.

Sistem monitoring yang dikembangkan tidak hanya menampilkan data secara langsung melalui LCD, tetapi juga memberikan informasi penting untuk evaluasi efisiensi pembakaran dan pengendalian emisi. Akurasi sensor yang tinggi, baik untuk suhu maupun gas buang, membuktikan bahwa sistem monitoring yang dikembangkan dapat diandalkan untuk evaluasi kinerja insinerator.

Ucapan Terima Kasih

Penghargaan dan ungkapan terima kasih kepada P3M Politeknik Negeri Lhokseumawe yang telah berkontribusi pendanaan dalam penelitian yang telah dilakukan.

Daftar Pustaka

- [1] Dos Santos, R. E., Dos Santos, I. F. S., Barros, R. M., Bernal, A. P., Tiago Filho, G. L., & da Silva, F. d. G. B., 2019. *Generating electrical energy through urban solid waste in brazil: An economic and energy comparative analysis*. Journal of environmental management, Vol. 231, pp. 198-206.
- [2] Alobaid, F. et al., 2018. *Dynamic simulation of a municipal solid waste incinerator*. Energy, Vol. 149, pp. 230-249.
- [3] Hafizal, M., Saifuddin, S., & Elfiana, E., 2024. *Karakterisasi biobriket dari peyueumisasi sampah pasar berdasarkan perbedaan ukuran partikel dan bentuk biobriket*. Jurnal Teknologi, Vol. 24, No. 1, pp. 92-98.
- [4] Kartini, K., Irwan, I., & Saifuddin, S., 2024. *Pemanfaatan bahan aditif untuk menaikkan nilai kalor briket dari sampah kota lhokseumawe*. Jurnal Teknologi, Vol. 24, No. 2, pp. 187-193.

- [5] Lesmana, A., Junaidi, J., & Kurniawan, E., 2021. *Rancang bangun alat pembakar sampah (incinerator) dengan burner oli bekas*. JTRAIN: Jurnal Teknologi Rekayasa Teknik Mesin, Vol. 2, No. 1, pp. 35-40.
- [6] Trinh, V. T., Van, H. T., Pham, Q. H., Trinh, M. V., & Bui, H. M., 2020. *Treatment of medical solid waste using an air flow controlled incinerator*. Polish Journal of Chemical Technology, Vol. 22, No. 1, pp. 29-34.
- [7] Huda, M. M., Sofyan, Y., & Rakhman, E., 2022. *Alat monitoring sistem burner incinerator masker portabel berbasis HMI*, in *Prosiding Industrial Research Workshop and National Seminar*, Vol. 13, No. 01, pp. 732-739.
- [8] Costa, M., Indrizzi, V., Massarotti, N., & Mauro, A., 2015. *Modeling and optimization of an incinerator plant for the reduction of the environmental impact*. International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, Vol. 25, No. 6, pp. 1463-1487.
- [9] Khuriati, A., 2021. *Otomasi sistem pengendalian suhu pada insinerator unggun tetap menggunakan pengendali dua posisi*. Berkala Fisika, Vol. 24, No. 3, pp. 80-87.
- [10] Khuriati, A., 2022. *Fopdt model based on experimental data from municipal solid waste incineration process temperature control in fixed bed*. Journal of Physics and Its Applications, Vol. 4, No. 2, pp. 33-36.
- [11] Gålfalk, M. & Bastviken, D., 2018. *Remote sensing of methane and nitrous oxide fluxes from waste incineration*. Waste management, Vol. 75, pp. 319-326.
- [12] Rahmawati, R., 2023. *Rancang bangun dielektrik meter untuk proses pencucian biodiesel*. Elektriese J. Sains dan Teknol. Elektro, Vol. 13, No. 01, pp. 62-73,
- [13] Efendi, R. et al., 2024. *Analisis regresi sederhana hasil pembacaan thermocouple amplifier adafruit max31856*. Sultra Journal of Mechanical Engineering, Vol. 3, No. 1, pp. 18-22.
- [14] Kurniawan, D., Sulistiyanti, S. R., & Murdika, U., 2023. *Sistem pemantau gas karbon monoksida (CO) dan karbon dioksida (CO₂) menggunakan sensor MQ7 dan MQ-135 terintegrasi telegram*. Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan, Vol. 11, No. 2.
- [15] Zhu, Y., Zhang, Y., Luo, D., Chong, Z., Li, E., & Kong, X., 2021. *A review of municipal solid waste in china: Characteristics, compositions, influential factors and treatment technologies*. Environment, Development and Sustainability, Vol. 23, pp. 6603-6622.
- [16] Wandasundari, M., Jati, D. R., & Desmaiani, H., 2024. *Pola sebaran emisi CO, NO_x, partikulat dan SO₂ dari sumber insinerator rumah sakit menggunakan model screen3*. Jurnal Teknologi Lingkungan Lahan Basah, Vol. 12, No. 2, pp. 517-525.
- [17] Prasetyadi, P., Wiharja, W., & Wahyono, S., 2018. *Teknologi penanganan emisi gas dari insinerator sampah kota*. Jurnal Rekayasa Lingkungan, Vol. 11, No. 2.
- [18] Costa, M., Massarotti, N., Mauro, A., Arpino, F., & Rocco, V., 2016. *CFD modelling of a RDF incineration plant*. Applied Thermal Engineering, Vol. 101, pp. 710-719.
- [19] Khabibimuna, A. R., Wahyuningsih, N. E., & Rahardjo, M., 2020. *Analisis efektivitas insinerator terhadap pengolahan limbah padat medis rumah sakit tipe A dan tipe B di Jakarta*. Media Kesehatan Masyarakat Indonesia, Vol. 19, No. 2, pp. 177-183.
- [20] Majedi, F., 2016. *Pengaruh penggunaan panas gas hasil pembakaran terhadap penguraian gas CO (karbon monoksida) menjadi C (karbon) dan O₂ (oksigen) pada asap knalpot sepeda motor dengan adsorben zeolit*. Journal of Electrical Electronic Control and Automotive Engineering (JEECAE), Vol. 1, No. 1, pp. 59-64.
- [21] Hasanah, M. N., Fauzan, R., & Putra, A., 2024. *Pemisahan oli bekas menggunakan alat separator dengan media pemisah karbon aktif dan kardus bekas*. Jurnal Teknologi, Vol. 24, No. 1, pp. 82-86.
- [22] Zulistyawan, K. A., 2023. *Identifikasi konsentrasi CO, CO₂, NO₂, SO₂, dan pm10 yang terukur di stasiun GAW bukit Kototabang selama mudik lebaran tahun 2019-2023*. Megasains, Vol. 14, No. 2, pp. 39-47.
- [23] Bogacka, M., Poranek, N., Łażniewska-Piekarczyk, B., & Pikoń, K., 2020. *Removal of pollutants from secondary waste from an incineration plant: The review of methods*. Energies, Vol. 13, No. 23, p. 6322.
- [24] Gunawan, G., Rahmawati, R., Haryani, D., & Kardiyono, K., Year. *Implementation of life*

cycle assessment (LCA) in cane sugar. in AIP Conference Proceedings, Vol. 2431, No. 1: AIP Publishing.

- [25] Ozturk, M.& Dincer, I., 2020. *An efficient waste management system with municipal solid waste incineration plant. Greenhouse Gases: Science and Technology, Vol. 10, No. 4, pp. 855-864.*