

Pengaruh Variasi Durasi Waktu Injeksi Oksigen Terhadap Performansi Insinerator Dual Chamber Limbah Medis

I Wayan Arya Darma^{1*}, I Nyoman Suprpta Winaya², I Putu Angga Yuda Pratama³,
& I Ketut Saky Sanatana⁴

^{1,2,3,4}. Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Udayana

*Email: aryadarma@unud.ac.id

ABSTRACT

Incineration is an effective waste processing method, especially for medical waste which is B3 waste. The high temperature combustion process in incineration is expected to be able to reduce medical waste optimally. However, emissions produced during the incineration process can pollute the surrounding environment and harm health. So it is necessary to develop incineration methods to reduce exhaust emissions but still be able to reduce medical waste optimally. In this research, additional oxygen injection was carried out in chamber 2 of the dual chamber medical waste incinerator by varying the duration of the oxygen injection time with the aim of obtaining optimal performance and reducing the resulting exhaust emissions. The research was carried out using medical waste weighing 1 kg with variations in the duration of oxygen injection, 2, 3 and 4 minutes. The research results show that increasing the duration of oxygen injection time can increase combustion efficiency, increase the temperature in chamber 2 and reduce the resulting exhaust gas emissions.

Keywords: *Incinerator, Dual chamber, Oxy-fuel*

PENDAHULUAN

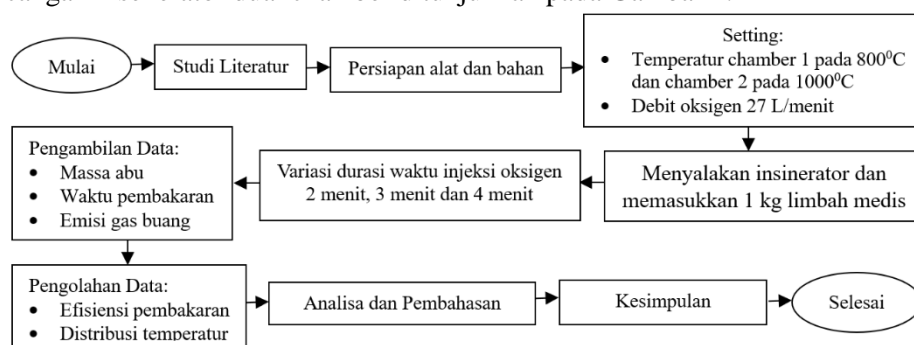
Limbah medis diklasifikasikan sebagai limbah B3 dan sebagian besar mencakup limbah penyakit menular, benda tajam, patologi, kimia, farmasi, sitotoksik, logam berat, dan radioaktif [1], [2]. Saat ini, insinerasi merupakan metode konversi termokimia yang paling populer untuk pengolahan limbah [3], seperti halnya pengolahan limbah medis [4], [5]. Insinerasi adalah suatu proses pengolahan sampah dimana sampah yang mudah terbakar dibakar pada suhu pembakaran 800°C atau lebih tinggi untuk mengurangi jumlah sampah sehingga tidak dapat didaur ulang dan untuk membunuh virus, bakteri, dan bahan kimia beracun. Proses ini berlangsung di dalam mesin yang disebut insinerator [6].

Pengolahan limbah medis menggunakan insinerator di RSUD Kota ABC dilakukan selama 2 jam dengan limbah medis sebanyak 67,5 kg mendapatkan hasil reduksi sebesar 62,88 kg [7]. Hal ini menjelaskan bahwa insinerator sangat efektif dalam mereduksi limbah medis. Namun, hasil pembakaran pada insinerator akan menghasilkan emisi gas buang yang berbahaya bagi kesehatan. Oleh sebab itu pemasangan Air Pollution Control Devices (APCD) pada insinerator sangat penting untuk mengurangi emisi yang dihasilkan [8]. Pengembangan insinerator menggunakan teknologi pembakaran dua tingkat serta penginjeksian oksigen untuk membakar limbah menunjukkan bahwa oksigen yang diinjeksikan pada ruang bakar kedua dapat mengikat CO dan membakarnya dengan sempurna serta mampu mengurangi emisi gas buang yang dihasilkan [9]. Pembakaran oxy-fuel adalah proses pembakaran yang menghilangkan sebagian besar nitrogen dari oksidator dengan cara memperbesar persentase oksigen yang bertujuan sebagai penangkap CO [10]. Pembakaran dari limbah padat kota dengan penginjeksian oksidasi O₂ memiliki distribusi temperatur yang stabil dengan konsentrasi oksigen sebesar 30,1% dan laju volume sebesar 150 NL/menit serta menghasilkan emisi CO yang rendah yaitu dibawah 100 mg/Nm³ dibandingkan menggunakan oksidasi seperti udara, O₂, dan CO₂ [11]. Hasil emisi CO dan HC pada pembakaran mesin pengapian dengan bahan bakar methanol menurun secara signifikan dengan meningkatnya persentase oksigen di udara serta efisiensi termal yang dihasilkan lebih tinggi dengan udara yang diperkaya oleh oksigen [12]. Investigasi pembakaran yang diperkaya oksigen pada emisi gas buang insinerator limbah padat kota dilakukan untuk mengetahui efek yang dihasilkan oleh pembakaran yang diperkaya oksigen pada emisi gas buang dan kinerja pembakaran dengan memasukan konsentrasi oksigen sebesar 21%, 24%, 27%, didapatkan hasil dengan meningkatnya oksigen,

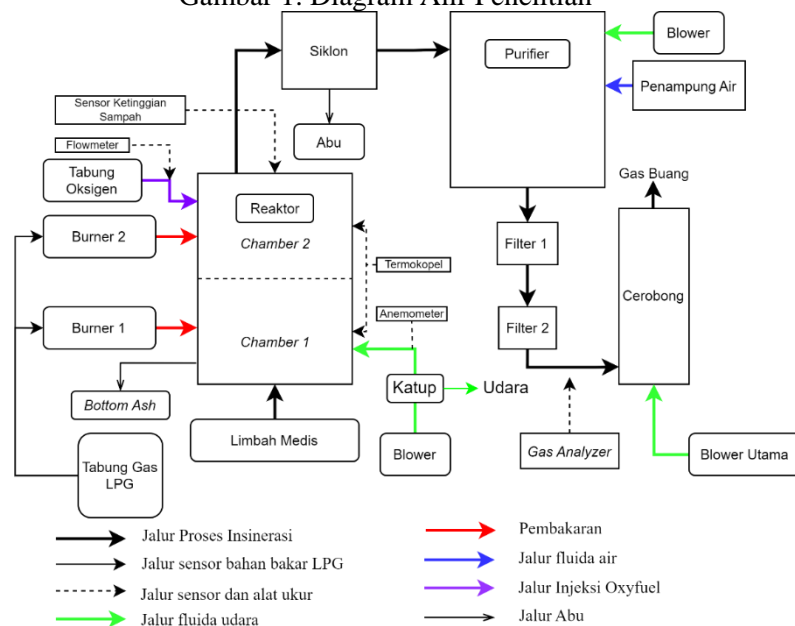
konsentrasi SO_2 dan emisi HCl menurun diikuti dengan meningkatnya suhu dalam tungku sehingga menghasilkan pembakaran yang lebih sempurna dan meningkatkan efisiensi termal mencapai 89,19% [13]. Pembakaran oxy-fuel pada circulating fluidized bed dilakukan untuk mengamati karakteristik pembakaran dan pengayaan CO_2 dengan bahan bakar limbah lumpur yang dicampurkan pelet kayu pada rasio campuran sebesar 0-70% dengan laju pencampuran oksigen sebesar 23% menghasilkan CO_2 yang tinggi yaitu lebih dari 90% dengan emisi polutan yang rendah yaitu sebesar 0,91% untuk CO dan 144 ppm untuk NO [14]. Berdasarkan penelitian yang sudah dijelaskan sebelumnya, proses pembakaran dengan penambahan oksigen dapat meningkatkan efisiensi pembakaran serta mengurangi emisi gas buang yang dihasilkan, namun pemakaian oksigen yang berlebih akan meningkatkan biaya operasional yang diperlukan dikarenakan harga oksigen yang cukup mahal. Oleh karena itu, penentuan durasi waktu injeksi oksigen yang tepat perlu dilakukan dan belum pernah dilakukannya penelitian tentang durasi waktu injeksi oksigen pada insinerator dual chamber. Sehingga lamanya waktu pembakaran dijadikan acuan dalam menentukan variasi durasi waktu tersebut. Penelitian ini untuk mengetahui hasil akhir performansi insinerator dual chamber pada variasi durasi waktu injeksi oksigen yaitu 2 menit, 3 menit, dan 4 menit.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen untuk menganalisis pengaruh durasi waktu injeksi oksigen selama 2 menit, 3 menit dan 4 menit terhadap performansi pada proses pembakaran limbah medis dengan insinerator dual chamber yang meliputi kandungan gas buang, efisiensi pembakaran dan distribusi temperatur. Diagram alir penelitian ditunjukkan pada Gambar 1 dan skematik rancangan insenerator dual chamber ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

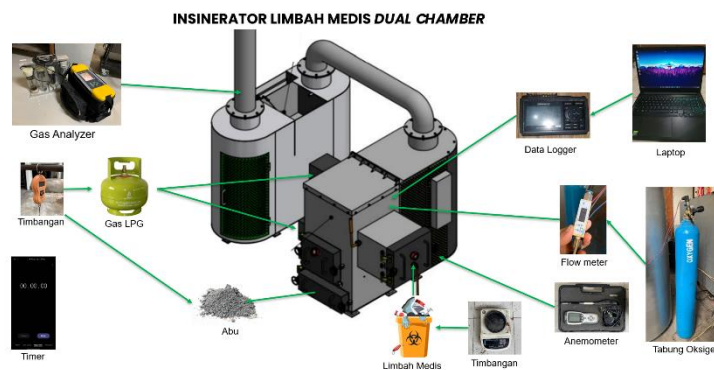


Gambar 2. Skematik Rancangan Insinerator *Dual Chamber*

Insinerator *dual chamber* tipe *fixed grate* ini menggunakan struktur berbahan dasar material black steel setebal 5 mm. Pada bagian dalam reaktor dipasang lapisan *ceramic fiber board* dengan ketebalan 10 cm untuk menahan panas agar tidak mempengaruhi bahan struktur dan keluar dari insinerator. Insinerator ini memiliki dua tingkat proses pembakaran yang terjadi di *chamber 1* dan *chamber 2*. *Chamber 1* adalah tempat berlangsungnya proses pembakaran limbah medis padat yang memiliki volume sebesar $0,2285 \text{ m}^3$ dengan temperatur maksimum sebesar 1300°C yang dihasilkan dari *burner 1*. *Chamber 2* berfungsi sebagai pembakaran kedua terhadap gas yang dihasilkan pada *chamber 1*, oksigen diinjeksikan di *chamber 2* yang bertujuan membantu pembakaran untuk menghasilkan emisi yang lebih baik. *Chamber 2* memiliki volume sebesar $0,0637 \text{ m}^3$ dengan temperatur operasi maksimum 1300°C .

Pada bagian bawah reaktor terdapat *fixed grate* dan penampungan abu (*bottom ash*). Asap hasil pembakaran di *chamber 2* akan menuju ke siklon yang memiliki tinggi 1,05 m untuk memisahkan antara padatan dan gas yang terkandung dalam asap hasil pembakaran, setelah itu gas akan melewati *gas line* sebelum menuju *purifier*, pada *gas line* terdapat sensor asap untuk mengontrol kepekatan asap yang melewatinya. *Gas line* terbuat dari pipa berbahan *black steel* dengan diameter dalam 20 cm serta dilapisi dengan *glass woll*. *Purifier* terdiri dari *filter* dan sistem pendingin yang menggunakan air dan udara dari blower sebagai fluida pendinginnya. *Filter* yang terdapat pada *purifier* berfungsi untuk menangkap CO_2 dan partikulat yang masih terbawa oleh gas hasil pembakaran. Setelah melalui *purifier*, gas akan dibuang ke lingkungan melalui cerobong dengan panjang cerobong 20 cm dan tinggi cerobong 3 m. Proses pengeluaran gas melalui cerobong menggunakan blower sehingga menyebabkan vakum pada sistem dan gas hasil pembakaran akan tertarik keluar melalui cerobong.

Alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Alat dan Bahan Penelitian

Prosedur penelitian yang dilakukan dalam pengujian adalah sebagai berikut: (1) Siapkan alat dan bahan penelitian; (2) Pastikan tekanan pada tabung gas oksigen dan tabung gas LPG minimal 20 bar; (3) Timbang sampel limbah yang akan diuji dan tabung gas LPG sebelum digunakan; (4) Set kecepatan udara dari blower di ruang *chamber 1* pada 10 m/s; (5) Set temperatur pada *chamber 1* sebesar 800°C dan temperatur pada *chamber 2* sebesar 1000°C pada sistem kontrol PLC; (6) Set laju aliran massa oksigen sebesar $6,5 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$ (27 L/menit); (7) Persiapkan timer untuk mengukur waktu proses insinerasi; (8) Set durasi waktu injeksi oksigen sesuai dengan variasi yang sudah ditentukan yaitu selama 2 menit, 3 menit dan 4 menit; (9) Nyalakan insinerator melalui sistem PLC dan tunggu sampai temperatur operasi mencapai temperatur yang ditetapkan; (10) Jika temperatur operasi sudah tercapai, masukan bahan bakar limbah medis seberat 1 kg; (11) Rekam distribusi temperatur pada *chamber* menggunakan *data logger* dan simpan data pada laptop; (12) Setelah sampah habis, matikan sistem insinerator dan tunggu sampai insinerator selesai proses pendinginan; (13) Setelah temperatur dibawah 100°C , ambil abu hasil insinerasi dan timbang untuk mendapatkan berat abu; (14) Timbang tabung gas LPG setelah pengujian; (15) Lakukan kembali pengujian sesuai dengan prosedur dari nomor 1 sampai nomor 14 hingga semua variasi durasi waktu injeksi oksigen yang ada pada nomor 8 terpenuhi; (16) Analisa data yang didapat dari hasil pengujian dan buat kesimpulan dari data yang didapat.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data hasil pengujian pada insinerator adalah berupa kebutuhan bahan bakar gas, massa limbah medis, massa abu dengan variasi durasi waktu injeksi oksigen. Hasil pengujian ini diperlihatkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Pengujian Insinerator

| No | Durasi Waktu Injeksi O ₂ (menit) | Limbah Medis | | Kebutuhan Bahan Bakar Gas (kg) |
|----|---|------------------|-------------------|--------------------------------|
| | | Massa Input (gr) | Massa Output (gr) | |
| 1 | 2 | 1025,44 | 88,24 | 0,452 |
| 2 | 3 | 1036,08 | 84,26 | 0,555 |
| 3 | 4 | 1024,48 | 71,42 | 0,674 |

Kandungan gas buang dan nilai kalor (LHV) terbaca melalui *gas analyzer*, dimana *gas analyzer* dipasang sebelum gas keluar melalui cerobong tepatnya dipasang pada purifier. Data yang diperoleh dari *gas analyzer* diperlihatkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Kandungan Gas Buang dan Nilai Kalor (LHV)

| Kandungan Gas (%) | Durasi Waktu Injeksi O ₂ (Menit) | | |
|--------------------------|---|-------|-------|
| | 2 | 3 | 4 |
| CO | 0,35 | 0,12 | 0,09 |
| CO ₂ | 13,76 | 14,16 | 14,45 |
| H ₂ | 0,38 | 0,27 | 0,23 |
| CH ₄ | 0,24 | 0,13 | 0,08 |
| N ₂ | 79,35 | 78,99 | 78,62 |
| O ₂ | 5,92 | 6,33 | 6,53 |
| LHV (MJ/m ³) | 0,16 | 0,08 | 0,06 |

Efisiensi pembakaran (η) dihitung dengan cara membagi total kalor yang digunakan ($Q_{in}-Q_{out}$) saat pembakaran dengan total kalor yang masuk (Q_{in}) kedalam ruang bakar. Efisiensi pembakaran dapat dihitung menggunakan Persamaan 1.

$$\eta = \frac{(Q_{in} - Q_{out})}{Q_{in}} \times 100\% \quad (1)$$

Untuk menghitung total nilai kalor yang digunakan dalam pembakaran, volume dari gas buang (v) perlu dihitung terlebih dahulu menggunakan Persamaan 2.

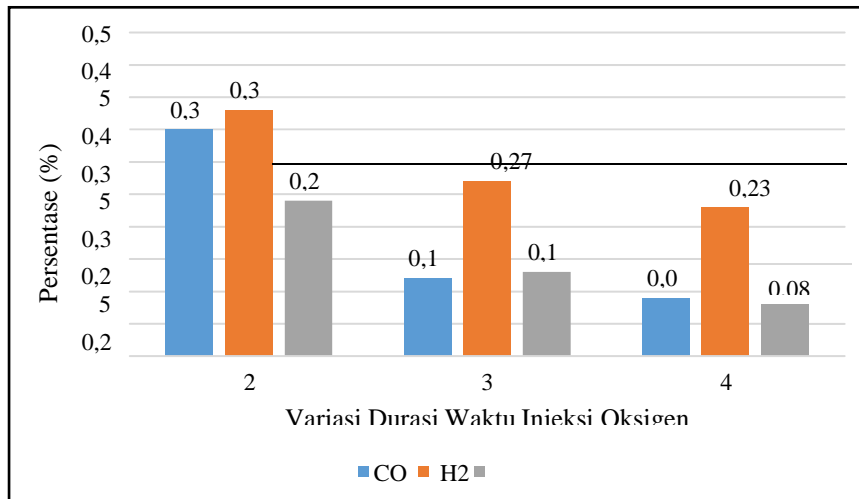
$$v = V.A.t \quad (2)$$

Diketahui waktu pembakaran (t) berlangsung selama 3 menit, kecepatan gas buang (V) disetiap variasi sebesar 3,71 m/s, dan luas penampang cerobong (A) sebesar 0,0314 m². Sehingga volume gas buang diperoleh sebesar 20,96 m³

Dalam menghitung efisiensi pembakaran, Q_{in} yang digunakan dalam Persamaan 1 merupakan penjumlahan dari massa limbah medis dikalikan LHV limbah medis dengan massa LPG dikalikan LHV LPG. Q_{out} merupakan hasil perkalian volume gas buang yang dihasilkan dengan LHV gas buang. LHV limbah medis sebesar 27,6420 MJ/kg dan LHV gas LPG yang digunakan didapat berdasarkan referensi sebesar 46,4 MJ/kg [15]. Data efisiensi pembakaran pada ketiga variasi durasi injeksi oksigen dapat dilihat pada Tabel 3.

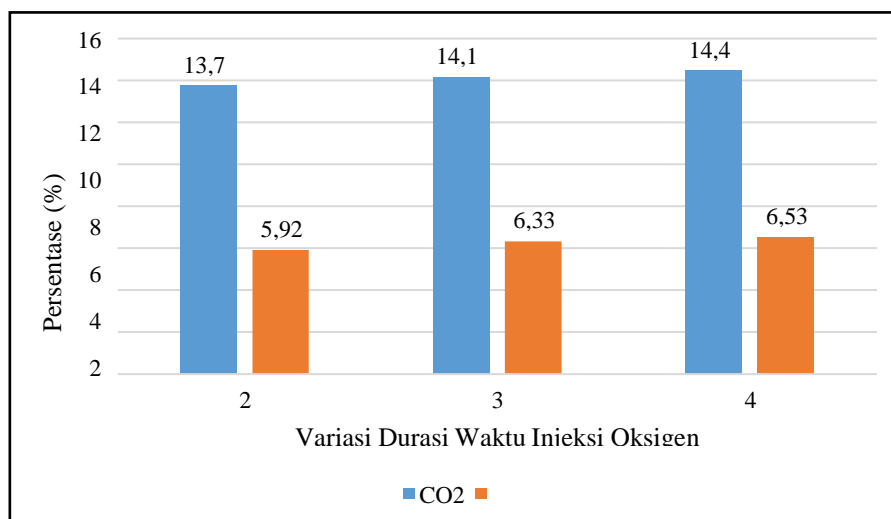
Tabel 3. Data Efisiensi Pembakaran

| No | Variasi Durasi Waktu Injeksi O ₂ (menit) | Efisiensi (%) |
|----|---|---------------|
| 1 | 2 | 93,22 |
| 2 | 3 | 96,74 |
| 3 | 4 | 97,87 |



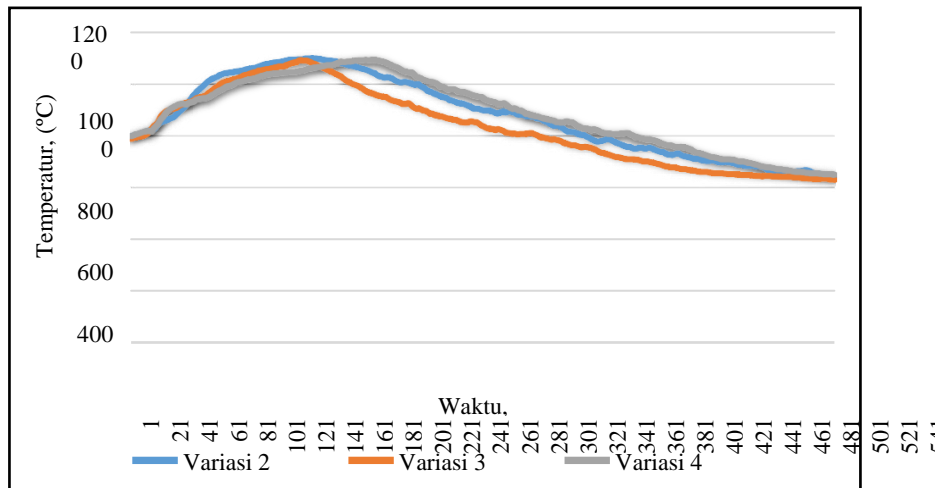
Gambar 4. Grafik Kandungan CO, H₂ dan CH₄ Pada Gas Buang

Dari Gambar 4 dapat terlihat kandungan emisi yang dihasilkan berupa CO, H₂, dan CH₄ berkurang seiring dengan bertambahnya durasi waktu injeksi oksigen dimana diperoleh kandungan CO terendah berada pada variasi ketiga, sedangkan nilai CO tertinggi terletak di variasi pertama. Tingginya nilai CO di variasi durasi waktu injeksi oksigen 2 menit disebabkan injeksi oksigen terhenti sebelum limbah medis terbakar seluruhnya di *chamber 1*, hal ini menyebabkan adanya reaksi gas-air pada *chamber 2*. Pada kandungan CH₄ dan H₂ juga demikian dimana nilai CH₄ dan H₂ tertinggi terletak pada variasi durasi waktu injeksi oksigen 2 menit. Tingginya nilai emisi CH₄ dan H₂ di variasi pertama disebabkan terjadinya reaksi *water shift* dan reaksi pembentukan metana akibat kurangnya oksigen yang diinjeksikan untuk mereaksikan emisi gas dari limbah medis. Kandungan CO, CH₄ dan H₂ paling rendah berada di variasi ketiga berturut-turut sebesar 0,09%; 0,23%; dan 0,08%.



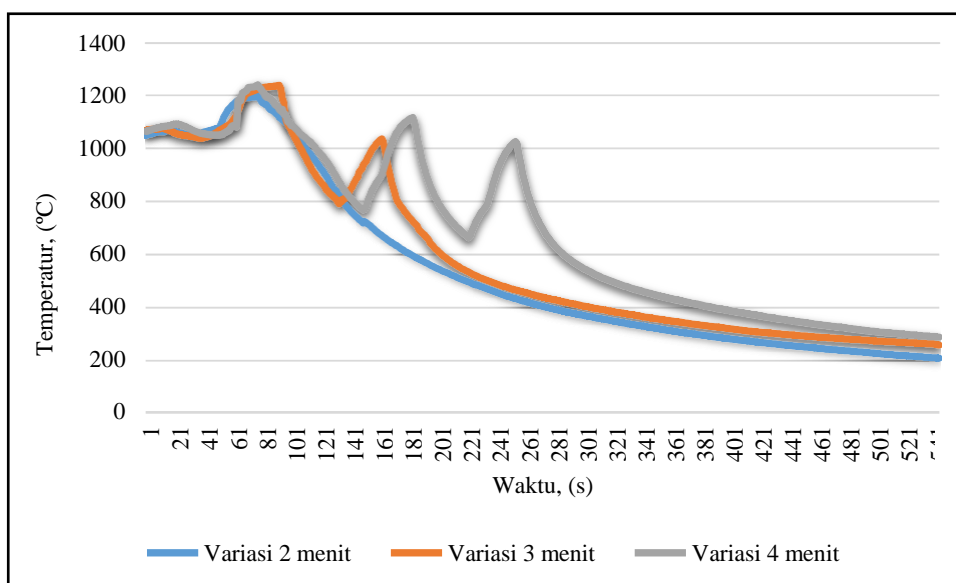
Gambar 5. Grafik Kandungan CO₂ dan O₂ Pada Gas Buang

Dari Gambar 5 dapat terlihat kandungan CO₂ dan O₂. Kandungan O₂ meningkat seiring dengan penambahan durasi waktu injeksi oksigen. Kandungan O₂ terendah terletak pada variasi durasi waktu injeksi oksigen 2 menit sebesar 5,92%. Tingginya O₂ pada variasi durasi waktu injeksi oksigen 4 menit disebabkan injeksi oksigen pada ruang bakar kedua berlebih, dimana gas dan partikulat sudah habis bereaksi namun oksigen tetap diinjeksikan sesuai dengan waktu interval yang sudah ditetapkan. Kandungan CO₂ tertinggi terletak pada variasi durasi waktu injeksi oksigen 4 menit sebesar 14,45% dan kandungan CO₂ terendah terletak pada variasi durasi waktu injeksi oksigen 2 menit sebesar 13,76%. Rendahnya CO₂ disebabkan kurangnya reaksi antara partikulat dengan oksigen di ruang bakar kedua dikarenakan interval waktu injeksi oksigen yang singkat.



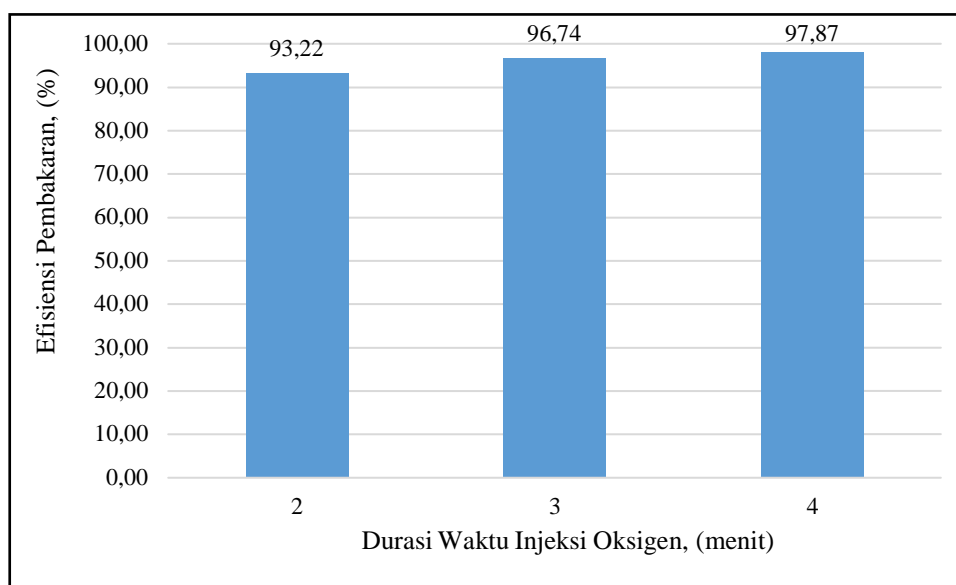
Gambar 6. Grafik Distribusi Temperatur *Chamber 1*

Pada Gambar 6 menunjukkan distribusi temperatur dalam *chamber 1* untuk setiap variasi yang dilakukan. Terdapat lonjakan temperatur yang sedikit berbeda pada *chamber 1* saat limbah medis dimasukkan. Puncak temperatur tertinggi terletak pada variasi durasi waktu injeksi oksigen 2 menit dengan temperatur mencapai 1099°C. Kemungkinan hal ini terjadi karena reaksi pembakaran pada ruang bakar pertama yang melepaskan lebih banyak panas untuk setiap limbah medis yang dimasukkan. Selain itu, adanya turbulensi yang lebih baik dari udara yang disuplai ke ruang bakar pertama sehingga pencampuran udara dalam ruang bakar pertama terjadi dengan lebih baik.



Gambar 7. Grafik Distribusi Temperatur *Chamber 2*

Pada Gambar 7 menunjukkan distribusi temperatur dalam *chamber 2* untuk setiap variasi yang dilakukan. Setelah limbah medis dimasukkan ke *chamber 1*, terjadi lonjakan temperatur yang signifikan di *chamber 2*. Seiring meningkatnya durasi waktu injeksi oksigen, terjadi peningkatan puncak temperatur di *chamber 1*. Variasi 4 menit menunjukkan puncak temperatur tertinggi yaitu sebesar 1241,3°C, yang disebabkan oleh suplai oksigen yang memenuhi kebutuhan oksigen untuk pembakaran. Selain itu profil temperatur yang terjadi juga berbeda-beda. Dengan meningkatnya variasi durasi waktu injeksi oksigen, lonjakan temperatur di ruang bakar kedua dapat terjadi lebih dari satu kali. Dapat dilihat pada variasi durasi waktu injeksi oksigen 4 menit, lonjakan temperatur terjadi sebanyak tiga kali, hal ini disebabkan oleh interval waktu pembakaran yang lebih lama. Setelah lonjakan awal, puncak temperatur di ruang bakar kedua akan menurun karena gas hasil pembakaran dari ruang bakar pertama telah berkurang.



Gambar 8. Grafik Efisiensi Pembakaran

Dari Gambar 8 didapatkan nilai efisiensi pembakaran setiap variasi mencapai nilai diatas 90%. Efisiensi pembakaran dipengaruhi oleh kadar emisi dan nilai LHV pada gas buang, seiring meningkatnya durasi waktu injeksi oksigen emisi gas buang menurun diikuti LHV gas buang juga ikut menurun. Pada variasi durasi waktu injeksi oksigen 4 menit efisiensi pembakaran lebih tinggi dibandingkan dengan variasi lainnya. Hal ini disebabkan pembakaran pada *chamber 1* berlangsung secara maksimal dan mampu mereduksi limbah medis dengan baik, selain itu pada *chamber 2* berlangsung pembakaran gas buang yang lebih efektif dan oksigen yang diinjeksikan dapat memenuhi kebutuhan limbah medis serta memenuhi kebutuhan udara *chamber 2* untuk mereaksikan kandungan emisi gas buang dari *chamber 1*. Hal ini mengakibatkan emisi gas buang dari *chamber 1* dapat terbakar dengan baik di *chamber 2* sehingga emisi yang dihasilkan menurun dan efisiensi dapat meningkat.

KESIMPULAN

Semakin lama durasi waktu injeksi oksigen menyebabkan reaksi pembakaran menjadi sempurna sehingga emisi CO, H₂, CH₄ menurun, dengan menurunnya kadar ketiga gas tersebut menyebabkan LHV gas buang menurun sehingga mampu meningkatkan efisiensi insinerator, sebaliknya untuk emisi CO₂ terjadi peningkatan yang menunjukkan bahwa pembakaran menjadi lebih maksimal dimana puncak temperatur meningkat di *chamber 2* seiring dengan peningkatan suplai oksigen dalam proses pembakaran. Saran yang perlu dipertimbangkan untuk penelitian selanjutnya adalah mengembangkan sistem injeksi oksigen dengan menambahkan suplai oksigen ke *chamber 2* lebih dari satu titik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] X. Cai and C. Du, *Thermal Plasma Treatment of Medical Waste*, vol. 41, no. 1. Springer US, 2021. doi: 10.1007/s11090-020-10119-6.
- [2] A. A. Erdogan and M. Z. Yilmazoglu, "Plasma gasification of the medical waste," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 57, pp. 29108–29125, 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.12.069.
- [3] S. M. H. D. Perera, C. Wickramasinghe, B. K. T. Samarasiri, and M. Narayana, "Modeling of thermochemical conversion of waste biomass – a comprehensive review," *Biofuel Res. J.*, vol. 8, no. 4, pp. 1481–1528, 2021, doi: 10.18331/BRJ2021.8.4.3.
- [4] S. Dharmaraj *et al.*, "Pyrolysis: An effective technique for degradation of COVID-19 medical wastes," *Chemosphere*, vol. 275, p. 130092, 2021, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.130092.
- [5] H. L. Zhao, L. Wang, F. Liu, H. Q. Liu, N. Zhang, and Y. W. Zhu, "Energy, environment and economy assessment of medical waste disposal technologies in China," *Sci. Total Environ.*, vol. 796, p. 148964, 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148964.
- [6] Sukamta, A. Wiranata, and Thoharuddin, "Pembuatan Alat Incinerator Limbah Padat Medis Skala Kecil," *Semesta Tek.*, vol. 20, no. 2, pp. 147–153, 2017.
- [7] H. Suprihatin, "Efektifitas Incinerator Untuk Pembakaran Sampah Medis di RSUD Kota ABC," *Din. Lingkungan Indones.*, vol. 5, no. 2, p. 76, 2018, doi: 10.31258/dli.5.2.p.76-83.
- [8] H. Anicetus, M. Samwel, S. Josephat, and M. Julius, "Assessment of Air Pollutant Emissions from Healthcare Waste Incinerators of Different Design Features," *African J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 14, no. 10, pp. 311–328, 2020, doi: 10.5897/AJEST2020.2882.
- [9] M. Suwarsono, Budiono, & Kholid, "Desain Insinerator Sampah Biomassa Rendah Emisi Untuk Instalasi Pengolahan Sampah," in *Seminar Nasional Teknologi dan Rekayasa*, 2019, pp. 126–131.
- [10] Z. Wang, "1.23 Energy and Air Pollution," in *Comprehensive Energy Systems*, 2018, pp. 909–949. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809597-3.00127-9>.
- [11] J. Becidan, M., Ditaranto, M., Carlsson, P., Bakken, J., Olsen, M. N. P., & Stuen, "Oxyfuel Combustion of a Model MSW— An Experimental Study," *Energies*, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/en14175297>.
- [12] K. A. S. Nidhi, "Experimental investigation on effects of oxygen enriched air on performance, combustion and emission characteristics of a methanol fuelled spark ignition engine," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 147, pp. 501–508, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.10.066>.
- [13] C. Ma *et al.*, "An investigation of an oxygen-enriched combustion of municipal solid waste on flue gas emission and combustion performance at a 8 MWth waste-to-energy plant," *Waste Manag.*, vol. 96, pp. 47–56, 2019, doi: 10.1016/j.wasman.2019.07.017.
- [14] J. H. Sung *et al.*, "Oxy-fuel co-combustion of sewage sludge and wood pellets with flue gas recirculation in a circulating fluidized bed," *Fuel Process. Technol.*, vol. 172, no. December 2017, pp. 79–85, 2018, doi: 10.1016/j.fuproc.2017.12.005.
- [15] A. Sugeng Widodo, "Peningkatan Efisiensi Sistem Pemanasan dengan Penambahan Grid pada Perforated Burner," *J. Rekayasa Mesin*, vol. 7(1), pp. 21– 25, 2016, doi: <https://doi.org/10.21776/ub.jrm.2016.007.01.4>.