

Perbandingan Performansi Insinerator Tipe *Fluidized Bed* Dan *Fixed Bed* Terhadap *Co-firing* Batu Bara Dan *Refuse Derived Fuel*

Faiz Aqila Wisprantoko, I Nyoman Suprpta Winaya dan I Putu Lokantara

Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana, Bukit, Jimbaran Bali

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisa performansi kinerja insinerator tipe fluidized-bed dan fixed-bed dalam proses co-firing dengan campuran bahan bakar batu bara sebagai bahan bakar utama dan refuse derived fuel (RDF) yang diperoleh dari TPST Kesiman Kertalangu Denpasar sebagai bahan bakar substitusi. Penelitian ini dilakukan dengan proses pembakaran RDF dan batu bara dengan massa bahan bakar 140 gram dan komposisi bahan bakar 10% RDF + 90% batu bara, serta pasir silika sebagai bed material. Udara disuplai menggunakan kompressor dengan kecepatan udara insinerator fluidized-bed sebesar 9 m/s dan kecepatan udara insinerator fixed-bed sebesar 6 m/s. Panas akan dihasilkan oleh reaktor yang terkontrol melalui panel kontrol listrik hingga 800°C. Hasil penelitian menunjukkan bahwa insinerator fluidized-bed memiliki distribusi temperatur yang lebih merata dan efisiensi pembakaran dari proses pembakaran insinerator fluidized-bed sebesar 83,32% menunjukkan angka yang lebih tinggi dibandingkan insinerator fixed-bed sebesar 48,09%. Selain itu, Hasil kandungan emisi gas buang dari insinerator fluidized-bed berupa CO; CO₂; CH₄; CnHm; H₂; O₂ secara berurutan adalah 3,31%; 0,39%; 0,08%; 0,96%; 20,7%. Sedangkan hasil kandungan emisi gas buang dari insinerator fixed-bed secara berurutan adalah 1,02%; 2,25%; 0,86%; 0,16%; 1,31%; 14,5%. Hasil gas buang pada insinerator fluidized-bed menunjukkan pembakaran yang lebih sempurna dibandingkan dengan insinerator fixed-bed.

Kata Kunci: Insinerator, Co-firing, Fluidized-bed, Fixed-bed, RDF, Efisiensi

Abstract

This study aims to analyze the performance of fluidized-bed and fixed-bed incinerators in the co-firing process using a fuel mixture of coal as the primary fuel and refuse-derived fuel (RDF) obtained from TPST Kesiman Kertalangu Denpasar as a substitute fuel. The study was conducted by burning RDF and coal with a total fuel mass of 140 grams and a fuel composition of 10% RDF + 90% coal, with silica sand used as the bed material. Air was supplied using a compressor, with the air velocity of fluidized-bed incinerator set at 9 m/s and air velocity of fixed-bed incinerator at 6 m/s. Heat was generated by the reactor and controlled through an electric control panel up to 800°C. The results of the study showed that the fluidized-bed incinerator had a more even temperature distribution and the combustion efficiency of the fluidized-bed incinerator combustion process of 83.32% was higher than the fixed-bed incinerator at 48.09%. Additionally, the emission gas composition from the fluidized-bed incinerator for CO, CO₂, CH₄, CnHm, H₂, and O₂ was recorded as 3.31%, 0.39%; 0.08%; 0.96%; 20.7% respectively. Meanwhile, the emission gas composition from the fixed-bed incinerator was recorded as 1.02%; 2.25%; 0.86%; 0.16%; 1.31%; and 14.5% respectively. The emissions gas results from the fluidized-bed incinerator demonstrate a more perfect combustion process compared to the fixed-bed incinerator.

Keywords: Incinerator, Co-firing, Fluidized-bed, Fixed-bed, RDF, Efficiency

1. Pendahuluan

Bali menjadi pionir dalam pengolahan sampah yang ada di Indonesia. Salah satu contohnya adalah dengan dikeluarkannya Pergub Bali No.47 Tahun 2019 yang membahas mengenai pengelolaan sampah berbasis sumber. jumlah sampah yang dapat dikelola di kota Denpasar sebanyak 296 ton dengan persentase sampah yang dapat dikelola terhadap timbulan sampah sebesar 27,27% sedangkan sampah yang tidak dapat dikelola sebanyak 20 ton dengan persentase sampah yang tidak dapat dikelola sebesar 1,87% [1].

TPA Sarbagita Suwung, yang melayani 4 kabupaten besar di Bali, kini mengalami kelebihan kapasitas. Sebagai solusi, Bali

membangun Tempat Pengelolaan Sampah Terpadu (TPST) Kesiman Kertalangu, salah satu dari tiga TPST di Denpasar, untuk mengolah sampah menjadi produk bernilai seperti *Refuse Derived Fuel* (RDF) dan briket *Municipal Solid Waste* (MSW).

RDF merupakan pengolahan sampah menggunakan metode *Waste to energy* yang sudah banyak digunakan di negara-negara maju seperti Inggris dan Amerika Serikat. Penggunaan RDF ramai digunakan sebagai energi alternatif di Inggris. Produksi RDF sebagai energi alternatif di Inggris berkontribusi dalam mengurangi 50% dari sampah kota yang akan dikirim ke TPA untuk dilakukan metode *landfill* [2].

Co-firing RDF dan batu bara menjadi salah satu solusi dalam penanganan dalam pengolahan sampah, mengurangi energi fosil, dan mengurangi emisi. Pengaplikasian *co-firing* RDF dan batu bara dapat dilakukan dengan proses insinerasi menggunakan insinerator. Terdapat dua tipe insinerator yang efisien dalam proses *co-firing* RDF dan batu bara yaitu *fluidized-bed* dan *fixed-bed*. Yang membedakan antara kedua tipe insinerator tersebut adalah kecepatan udara masuk pada insinerator *fluidized-bed* lebih tinggi dibandingkan dengan insinerator *fixed-bed*, yang menyebabkan terjadinya prinsip fluida terhadap bahan bakar selama proses pembakaran insinerator *fluidized-bed*.

Penelitian ini memiliki tujuan untuk menganalisa perbandingan *fluidized-bed* dan *fixed-bed* terhadap *co-firing* batu bara dan *refuse derived fuel*. Untuk mendapatkan hasil yang diinginkan, maka terdapat batasan masalah berupa:

1. Alat yang digunakan merupakan insinerator tipe *fluidized bed* dan *fixed bed*.
2. Suhu operasi yang digunakan adalah 800°C.
3. Massa pasir silika yang digunakan sebanyak 420 gram
4. Massa bahan bakar yang digunakan sebanyak 140 gram
5. Bahan bakar utama yang digunakan adalah batu bara.
6. Bahan bakar substitusi yang digunakan adalah RDF yang diperoleh dari TPST Kesiman Kertalangu.
7. Rasio bahan bakar yang digunakan adalah 10% RDF + 90% batu bara
8. Jenis bed material yang digunakan adalah pasir silika dengan ukuran 0,8 mm - 1,2 mm.

2. Dasar Teori

Sampah memiliki definisi sesuatu yang sudah tidak dipakai, tidak digunakan, tidak disenangi, atau sesuatu yang dibuang yang berasal dari kegiatan manusia dan tidak terjadi dengan sendirinya [3]. Seiring dengan laju pertumbuhan penduduk akan berimbas pada pertumbuhan Kawasan urban yang mengakibatkan pada kebutuhan akan ketersediaan lahan, ketersediaan pangan, dan peningkatan kebutuhan energi. Dengan adanya kebutuhan yang meningkat ini pada akhirnya akan mempengaruhi lingkungan sekitar. Terlepas dari sampah akibat industri dan pembangunan, aktivitas manusia sehari-hari memiliki peran yang besar dalam menghasilkan sampah berupa sampah rumah tangga. Sampah dapat diklasifikasikan berdasarkan asal seperti sampah rumah tangga, berdasarkan sifat seperti sampah organik dan anorganik, serta

berdasarkan bentuknya seperti sampah basah dan kering [4],[5].

RDF merupakan jenis bahan bakar alternatif yang dihasilkan dari pengelolaan limbah padat, terutama dari sampah perkotaan atau limbah padat. RDF memiliki peran penting sebagai bahan aditif bahan bakar fosil, dapat meningkatkan penghematan ekonomi, dan dapat mengurangi senyawa CO₂ dan senyawa efek rumah kaca lainnya [6]. karakteristik dan komposisi sampah kota, termasuk *moisture content* MSW, sangat berpengaruh dalam kualitas RDF. *Moisture content* MSW yang rendah dapat menghasilkan RDF dengan nilai kalor tinggi[7].

Co-firing atau *Co-combustion* adalah suatu proses pembakaran menggunakan dua jenis bahan bakar atau lebih seperti batu bara dengan biomassa yang dioperasikan bersamaan. Pembakaran dengan metode *Co-firing* merupakan salah satu upaya untuk mengurangi sampah dan mengurangi penggunaan energi fosil dengan menjadikan biomassa sebagai energi alternatif dan berkelanjutan[8].

Insinerator adalah teknologi pengolahan sampah melalui proses pembakaran bahan organik yang terdapat dalam sampah diatas *bed material*. Teknologi ini mengubah sampah menjadi energi panas, gas buang, dan abu yang dilepaskan ke atmosfer. Terdapat dua tipe insinerator yang efisien dalam proses *co-firing* RDF dan batu bara yaitu *fluidized-bed* dan *fixed-bed*.

Fluidized-bed incinerator adalah alat yang dirancang berdasarkan prinsip mekanika fluida untuk membakar bahan dengan menggunakan udara yang dialirkan dari bagian bawah ruang bakar dengan kecepatan tertentu, sehingga dapat menembus lapisan bahan atau media padat. Akibatnya, media padat tersebut akan berhamburan atau bergerak dan memiliki sifat mirip dengan fluida [9].

Fixed-bed Incinerator adalah metode tertua dan paling umum digunakan dalam sejarah. Aspek dasar pembakaran pada *fixed-bed incinerator* material dipanaskan, dikeringkan, diupkan, dan dibakar, di atas *bed* material berupa pasir silika sehingga menyisakan abu [10]

3. Metode Penelitian

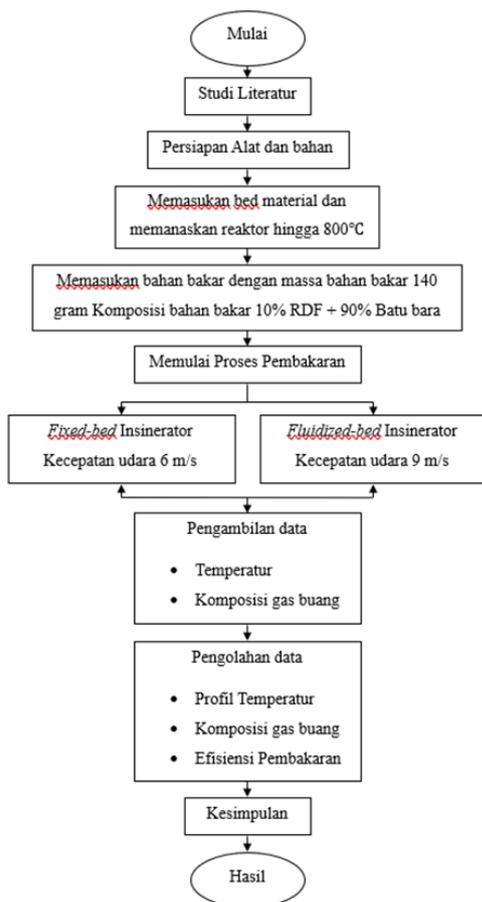
Adapun alat dan bahan yang diperlukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

3.1. Alat dan Bahan

Adapun alat dan bahan yang diperlukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

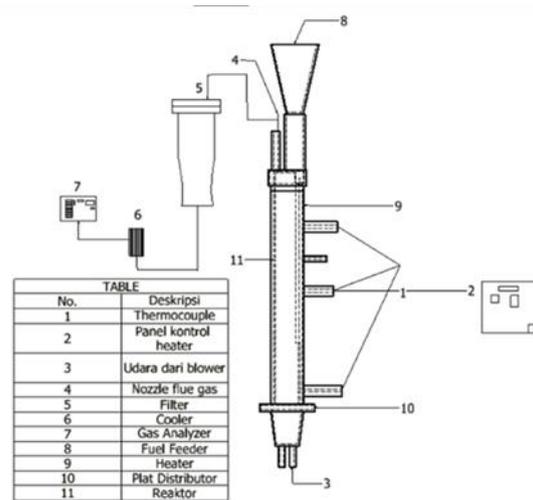
1. Reaktor
2. Kompresor
3. Plat Distributor
4. Heater
5. Fuel Feeder
6. Thermo Control
7. Isolator Fiber Wool
8. Filter Gas Buang
9. Cooling Box
10. Thermocouple
11. Gas Analyzer
12. Timbangan
13. Anemometer
14. Refuse Derived Fuel
15. Batu Bara
16. Pasir Silika

3.2. Diagram Alir Penelitian



Gambar 2 Diagram Alir Penelitian

3.3. Skematik Alat



Gambar 1 Skematik Alat

3.4. Efisiensi Pembakaran

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

$$Q_{in} = m_{bb} \times LHV_{bb} \quad (2)$$

$$Q_{out} = V_{gas} \times LHV_{gas} \quad (3)$$

Keterangan;

- η = Efisiensi pembakaran (%)
- Q_{in} = Energi masuk (MJ)
- Q_{out} = Energi terbuang (MJ)
- m_{bb} = Berat bahan bakar sampah (kg)
- LHV_{bb} = Low Heating Value bahan bakar (MJ/kg)
- V_{gas} = Volume gas buang
- LHV_{gas} = Low Heating Value gas buang (MJ/kg)

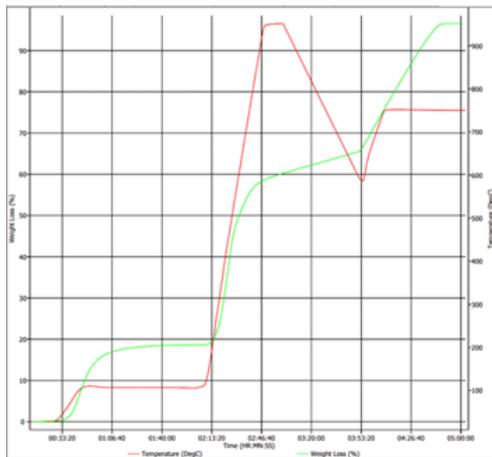
4. Hasil Penelitian

4.1 Karakteristik Bahan Bakar

Tabel 1 Hasil Uji Proximate

Fuel	Moisture (%)	Kandungan Abu (%)	Karbon Tetap (%)	Volatile Matter (%)
RDF 10% + Batu bara 90%	18,62	3,42	36,52	41,43

Karakteristik bahan bakar dilakukan untuk mengetahui kandungan dan komposisi bahan bakar yang akan diuji. Pengujian proximate dilakukan menggunakan alat Thermogravimetri Analyst 701 yang dilakukan dengan metode ASTM-D-7582 MVA BIOMA.



Gambar 3 Grafik TGA RDF 10% + Batu Bara 90%

Gambar grafik TGA menunjukkan penurunan massa bahan bakar seiring dengan kenaikan temperatur.

4.2 Nilai Kalo Bahan Bakar

Analisis nilai kalor digunakan untuk mengetahui jumlah energi panas yang terlepas untuk tiap satuan massa bahan bakar dengan komposisi bahan bakar 10% RDF + Batu Bara 90%. Pengujian nilai kalor dilakukan menggunakan alat Parr 1341 Oxygen Bomb Calorimeter dengan standar ASTM Standard Test Method D5865 yang dilakukan di Lab Analisa Bahan, Fakultas Teknik, Universitas Udayana.

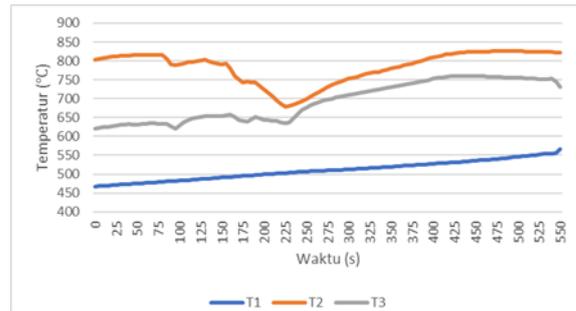
Tabel 2 Analisis Nilai Kalor Bahan Bakar

Fuel	Berat Sampel	Temperatur		Nilai Kalor	
		T1	T2	(Cal/gr)	(Mj/kg)
RDF 10% +Batu Bara 90%	1,004	26,574	29,0001	4351,748	18,22

4.3 Profil Temperatur

Distribusi temperatur pada ruang bakar menggunakan 3 buah *thermocouple* yang diletakan di dalam reaktor secara bertingkat. *Thermocouple* 1, yang ditandai T1 berada di dasar reaktor untuk mengukur temperatur pada *bed material*. Kemudian *thermocouple* 2 yang ditandai T2 berada di atas *thermocouple* 1 dengan jarak 10 cm yang berfungsi untuk mengukur temperatur di atas *bed material* pada ruang bakar. Lalu ada *thermocouple* 3 yang ditandai T3 di atas *thermocouple* 2 dengan fungsi mengukur temperatur di bagian atas ruang pembakaran.

Grafik dari gambar 4 dan gambar 5 menunjukkan terjadi penurunan temperatur dari kedua insinerator secara teratur yang disebabkan dibukanya fuel feeder untuk memasukan bahan bakar pada saat waktu 0 sekon secara perlahan. Setelah semua bahan bakar dimasukan. Grafik menunjukkan kenaikan temperatur. Setelah bahan bakar dimasukan, garfik menunjukan kenaikan temperatur di semua titik *thermocouple* dengan temperatur tertinggi dihasilkan oleh T2. Hal ini disebabkan karena proses pembakaran terjadi di bagian tengah reaktor dimana T2 berada. Dilihat grafik

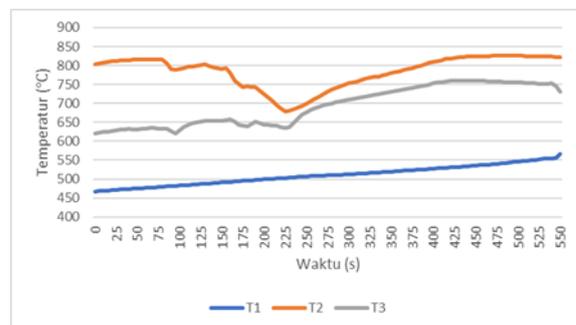


Gambar 4 Distribusi Temperatur Fluidized-bed Incinerator

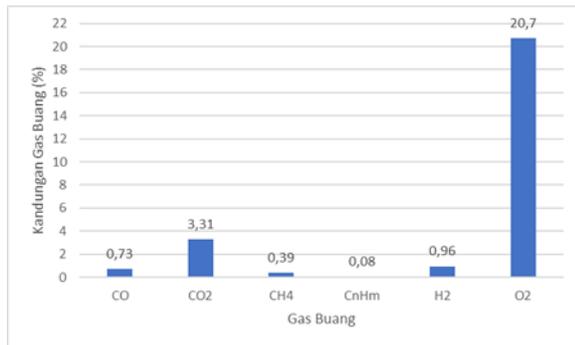
distribusi temperatur di atas, kedua insinerator memiliki pola yang sama yaitu penurunan temperatur Ketika bahan bakar dimasukan, dan kenaikan setelah diberikan udara. Temperatur pada kedua insinerator akan menurun secara berkala saat proses pembakaran sudah selesai.

4.4 Kandungan Gas Buang

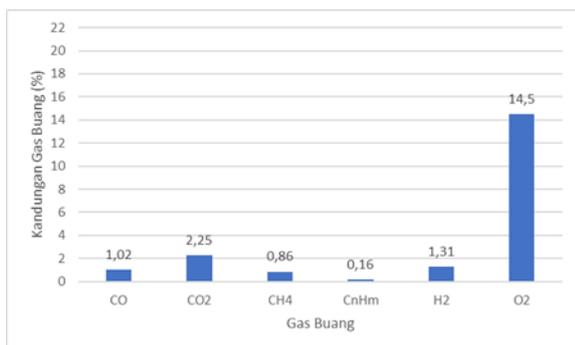
Pada proses pembakaran terdapat komponen-komponen gas yang dihasilkan akibat reaksi kimia antara bahan bakar dan oksigen selama pembakaran. Hasil kandungan gas selama proses pembakaran akan dilepaskan ke atmosfer melalui system pembuangan dan dapat mencerminkan efisiensi pembakaran serta dampak lingkungan dari proses tersebut.



Gambar 5 Distribusi Temperatur Fixed-bed Incinerator



Gambar 6 Grafik Kandungan Gas Buang Fluidized-bed incinerator



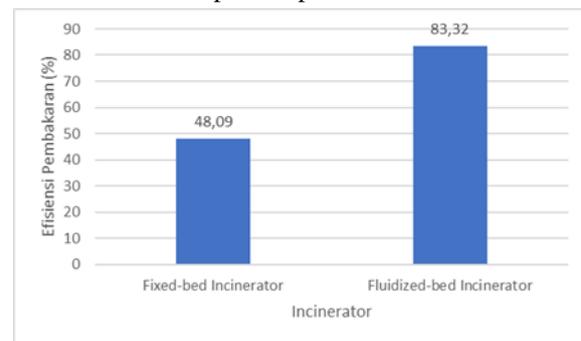
Gambar 7 Grafik Kandungan Gas Buang Fixed-bed Incinerator

Pada insinerator fluidized-bed kandungan oksigen (O₂) lebih tinggi (20,7%) dibandingkan insinerator fixed-bed (14,5%), menunjukkan adanya sisa oksigen yang lebih besar. Namun, pembakaran lebih efisien terlihat dari konsentrasi karbon monoksida (CO) pada insinerator fluidized-bed (0,73) yang lebih rendah dibandingkan dengan insinerator fixed-bed (1,02). Kandungan karbon dioksida (CO₂) lebih tinggi pada insinerator fluidized-bed (3,31%) dibandingkan insinerator fixed-bed (2,25%), mengindikasikan pembakaran lebih sempurna. Selain itu, metana (CH₄) dan hidrokarbon lainnya (CnHm) juga lebih rendah pada insinerator fluidized-bed, masing-masing 0,39% dan 0,08%, dibandingkan dengan insinerator fixed-bed, yang mencapai 0,87% dan 0,16%. Kandungan hidrogen (H₂) pada insinerator fluidized-bed (0,96%) lebih rendah dibandingkan insinerator fixed-bed (1,31%). Secara keseluruhan, insinerator fluidized-bed menunjukkan efisiensi pembakaran yang lebih tinggi dibandingkan fixed-bed, dengan sisa bahan bakar yang lebih sedikit dan pembakaran yang lebih sempurna.

4.5 Efisiensi Pembakaran

Analisis data efisiensi pembakaran bertujuan untuk menunjukkan seberapa besar energi panas yang dimanfaatkan dalam proses insinerasi. Perhitungan efisiensi pembakaran dilakukan dengan membandingkan energi panas

yang digunakan dengan energi panas yang masuk ke dalam proses pembakaran.



Gambar 8 Grafik Efisiensi Pembakaran

Berdasarkan gambar 8, didapatkan hasil efisiensi pembakaran insinerator fluidized-bed lebih tinggi dengan sebesar (83,32%) dibandingkan insinerator fixed-bed dengan sebesar (48,09). Tingginya efisiensi pada insinerator fluidized-bed oleh aliran udara yang lebih tinggi, menghasilkan pembakaran yang lebih merata dan efisien. Selain itu, konsentrasi CO yang dihasilkan insinerator fluidized bed lebih rendah (0,73%) dibandingkan insinerator fixed-bed (1,02%), mengindikasikan pembakaran lebih sempurna pada insinerator fluidized-bed. Kandungan CO₂ pada insinerator fluidized-bed lebih tinggi (3,31%) dibandingkan insinerator fixed-bed (2,25%), yang juga mendukung efisiensi pembakaran yang lebih baik.

5. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan pada perbandingan fluidized-bed incinerator dan fixed-bed incinerator terhadap co-firing batu bara dan refuse derived fuel. Maka dapat disimpulkan bahwa insinerator fluidized-bed lebih efisien dibandingkan dengan insinerator fixed-bed.

Efisiensi pembakaran dari proses pembakaran fluidized-bed incinerator (83,32%) menunjukkan angka yang lebih tinggi dibandingkan fixed-bed incinerator (48,09%). Hal ini disebabkan oleh aliran udara yang lebih tinggi dan menyebabkan pembakaran lebih merata dan efisien.

Emisi gas buang dari fluidized-bed incinerator menghasilkan gas CO₂ (3,31%) yang lebih tinggi dibandingkan dengan fixed-bed incinerator (2,25%). Sedangkan, gas CO yang dihasilkan oleh fixed-bed incinerator (1,02%) lebih tinggi dibandingkan fluidized-bed incinerator (0,73%). Hal ini, menunjukkan pembakaran fluidized-bed incinerator lebih efisien.

Daftar Pustaka

- [1] Balisatudata, "https://balisatudata.baliprov.go.id/laporan/data-pengelolaan-sampah-perkabupatenkota-di-provinsi-bali?district_id=&sub_district_id=&year=2022&month=&date="
- [2] Y. Yang *et al.*, "Gasification of refuse-derived fuel from municipal solid waste for energy production: a review," *Environ Chem Lett*, vol. 19, pp. 2127–2140, 2021.
- [3] J. Dobiki, "Analisis ketersediaan prasarana persampahan di pulau kumodan pulau kakara di kabupaten halmahera utara," *Spasial*, vol. 5, no. 2, pp. 220–228, 2018.
- [4] UU No. 18 Tahun 2008, "Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 18 Tahun 2008 Tentang Pengelolaan Sampah."
- [5] M. Darmawan, S. Yulinah Trihadiningrum, and M. AppSc, "Final Project-RE091324 Study On Solid Waste Treatment In Mulyoagung Bersatu Recycling Facility In DAU Sub-District, Malang District," 2014.
- [6] I. Brás, M. E. Silva, G. Lobo, A. Cordeiro, M. Faria, and L. T. de Lemos, "Refuse derived fuel from municipal solid waste rejected fractions-a case study," *Energy Procedia*, vol. 120, pp. 349–356, 2017.
- [7] D. Indrawati, M. Lindu, and P. Denita, "Potential of solid waste utilization as source of refuse derived fuel (RDF) energy (case study at temporary solid waste disposal site in West Jakarta)," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018. doi: 10.1088/1755-1315/106/1/012103.
- [8] E. Nuryanto, S. Sudarno, and Y. Winardi, "Pengaruh Co-firing Serbuk Kayu Kedondong Terhadap Performa Dan Emisi Gas Buang Briket Batu Bara," *Jurnal Rekayasa Mesin*, vol. 15, no. 1, pp. 367–375, 2024.
- [9] A. F. Falaah, A. Cifriadi, and A. C. Kumoro, "Produksi Silika Amorf dari Sekam Padi untuk Filler Barang Jadi Karet Menggunakan Fluidized Bed Combustor," *Warta Perkaretan*, vol. 35, no. 1, pp. 77–88, 2016.
- [10] M. L. Hobbs, P. T. Radulovic, and L. D. Smoot, "Combustion and gasification of coals in fixed-beds," *Prog Energy Combust Sci*, vol. 19, no. 6, pp. 505–586, 1993.

	<p>Faiz Aqila Wisprantoko</p> <p>Menyelesaikan program sarjana di Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana tahun 2025.</p>
<p>Judul tugas akhir Perbandingan Performansi Insinerator Tipe Fluidized Bed dan Fixed Bed Terhadap Co-firing Batu Bara Dan Refuse Derived Fuel</p>	

	<p>Prof. I Nyoman Suprpta Winaya, S.T., MA.Sc., Ph.D. menyelesaikan studi S1 di Universitas Udayana pada tahun 1994, S2 di Dalhousie University pada tahun 2000, dan S3 di Niigata University pada tahun 2008. Prof. I Nyoman Suprpta Winaya, S.T., MA.Sc., Ph.D memiliki konsentrasi ilmu dalam bidang konversi energi.</p>
--	--

	<p>Dr. I Putu Lokantara, ST, MT menyelesaikan studi S1 di Institut Teknologi Sepuluh Nopember pada tahun 1994, S2 di Institut Teknologi Sepuluh Nopember pada tahun 2000, dan S3 di Universitas Udayana pada tahun 2021. Dr. I Putu Lokantara, ST, MT memiliki konsentrasi ilmu dalam bidang manufaktur</p>
--	---