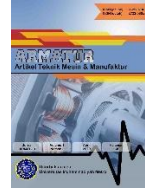


Contents list available at [Sinta](https://sinta)**A R M A T U R**

: Artikel Teknik Mesin & Manufaktur

Journal homepage: <https://scholar.unmetro.ac.id/index.php/armatur>**Analisis suhu pembakaran sampah kering sebagai sumber energi panas untuk proses pengeringan****Angga Darma Prabowo^{1*}, Hadi Prayitno², Dondi Kurniawan³, Martinus⁴, Ahmad Yonanda⁵**^{1,2,3,4,5}Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung, Jalan Prof. Dr Jl. Prof. Dr. Ir. Sumantri Brojonegoro No.1, Kota Bandar Lampung, Lampung, Indonesia**A R T I C L E
I N F O****Keywords:**
Waste
Heat Recovery
Incineration
Heat Exchanger
CFD**A B S T R A C T**

Waste management poses a significant environmental challenge, yet dry waste holds potential as a renewable energy source through Waste-to-Energy (WTE) technology. This study aims to analyze the potential of utilizing heat from dry waste combustion for drying applications using a hybrid approach of experimental methods and Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation. The experimental stage was conducted by burning dry waste in a furnace to obtain the average hot gas temperature, which was measured at 295.33°C. This value was then used as a boundary condition in the CFD simulation of an integrated heat exchanger system within the furnace. Air at a temperature of 30°C was flowed into the heat exchanger with four mass flow rate variations (0.087, 0.092, 0.126, and 0.165 kg/s). The simulation results show that the system is capable of heating the air to a temperature range of 46.05°C to 58.05°C, which is ideal for drying applications. An inverse relationship was found between the mass flow rate and the outlet temperature, where a lower flow rate results in hotter air. This research proves that the heat recovery system from dry waste combustion is technically feasible and has the potential to be a sustainable alternative energy solution for drying processes.

Pendahuluan

Pengelolaan sampah kering dan pemanfaatan energi dari limbah merupakan

fokus utama dalam mendorong ekonomi sirkular dan pengurangan emisi karbon secara global [1, 2]. Pembakaran sampah

*Corresponding author: anggaprabowo@eng.unila.ac.id

DOI: <https://doi.org/10.24127/armatur.v7i1.10423>

Received 09 Oktober 2025; Received in revised form 21 Oktober 2025; Accepted 27 Desember 2025

Available online 1 Maret 2026

kering di tungku insinerator tidak hanya mengurangi volume limbah hingga 95% [3], tetapi juga menghasilkan panas yang berpotensi dimanfaatkan untuk keperluan industri lain. Teknologi *waste-to-energy* (WTE) menjadi alternatif berkelanjutan pengganti *landfill* dengan kemampuan menghasilkan energi listrik dan panas yang signifikan [4, 5].

Proses pembakaran menghasilkan suhu bervariasi, dengan rentang optimal antara 850°C hingga 1100°C guna memastikan pembakaran sempurna dan emisi minimal [6]. Municipal Solid Waste (MSW) dengan kadar air rendah yang telah melalui proses pengeringan dapat memiliki nilai kalor hingga 6500 kJ/kg, memungkinkan proses pembakaran mandiri tanpa memerlukan bahan bakar tambahan [7]. Potensi besar panas dari hasil pembakaran ini dapat dimanfaatkan secara luas untuk berbagai proses pengeringan di sektor industri lainnya [8, 9].

Heat exchanger tipe pipa menjadi salah satu teknologi utama dalam pemanfaatan panas dari limbah industri [10]. Gas buang bersuhu tinggi dialirkan melalui *heat exchanger* untuk menaikkan suhu udara bersih yang berfungsi sebagai media pengering. Penerapan teknologi ini terbukti efisien dalam mengurangi konsumsi bahan bakar primer hingga 12-40%, tergantung pada desain dan kondisi operasi sistem [11].

Computational Fluid Dynamics (CFD) berperan penting dalam analisis serta optimasi sistem pembakaran dan *heat exchanger* [12, 13]. Simulasi CFD memungkinkan pemetaan distribusi temperatur, pola aliran, dan efisiensi perpindahan panas dengan akurasi tinggi, sehingga memberikan wawasan penting untuk optimasi desain sistem [12]. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa simulasi CFD mampu memprediksi performa sistem dengan tingkat kesalahan kurang dari 5% dibandingkan data eksperimental [12].

Berbagai konfigurasi *heat exchanger*, seperti tipe *shell and tube*, sering digunakan karena daya tahan dan

kemudahan perawatannya [14]. Efisiensi pemulihan panas (*heat recovery*) dari tipe ini dapat mencapai 14%, dengan potensi pengurangan konsumsi bahan bakar hingga 27 kg/jam dalam aplikasi pemanasan industri [14].

Pengeringan dengan udara panas yang dihasilkan dari pemulihan panas limbah (*waste heat recovery*) telah terbukti efektif pada berbagai sektor industri. Temperatur masuk udara sekitar 30°C dapat dipanaskan hingga mencapai 75-101°C melalui *heat exchanger* yang optimal, menciptakan kondisi ideal untuk pengeringan bahan agrikultur dan industri [11]. Sebuah studi CFD di Indonesia juga menunjukkan bahwa pendekatan ini menghasilkan efisiensi energi yang signifikan dan distribusi suhu yang lebih merata pada ruang pengering [15].

Aspek ekonomi dari implementasi *heat recovery* menunjukkan nilai yang sangat ekonomis, dengan *payback period* yang pendek dan potensi penghematan biaya energi tahunan antara USD 1,786 hingga USD 18,460, bergantung pada karakteristik limbah dan harga energi lokal [16]. Hal ini menjadikan teknologi *heat recovery* tidak hanya sebagai solusi yang ramah lingkungan tetapi juga menguntungkan secara ekonomis untuk skala industri [17].

Di Indonesia, potensi WTE dengan *heat recovery* sangat besar karena meningkatnya volume MSW serta kebutuhan energi yang terus bertambah [4]. Kandungan organik yang tinggi dan kadar air yang bervariasi pada MSW di Indonesia menuntut pendekatan desain yang spesifik untuk sistem pembakaran dan pemulihan panas [18]. Proses pengeringan awal pada MSW terbukti dapat meningkatkan nilai kalor dan stabilitas operasional, serta menciptakan sinergi yang baik dengan sistem *heat recovery* [18].

Validasi hasil eksperimen dengan simulasi CFD menjadi kunci penting untuk optimalisasi sistem *heat recovery* [9, 19]. Studi gabungan semacam ini menunjukkan bahwa integrasi keduanya dapat berkontribusi pada pengurangan konsumsi

energi dan emisi CO₂ hingga 12% [20]. Pendekatan ini secara signifikan meningkatkan keandalan dan akurasi prediksi kinerja sistem *waste heat recovery*.

Meskipun demikian, masih terdapat celah penelitian (*research gap*), terutama dalam pengembangan sistem terintegrasi yang mencakup pembakaran, pemulihan panas, dan pengeringan yang responsif terhadap variasi bahan baku serta kondisi operasi yang dinamis. Strategi kontrol adaptif dan pemeliharaan prediktif berbasis CFD dianjurkan untuk meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem. Evaluasi siklus hidup dan analisis tekno-ekonomi yang komprehensif juga diperlukan untuk mendukung implementasi komersial teknologi ini secara luas.

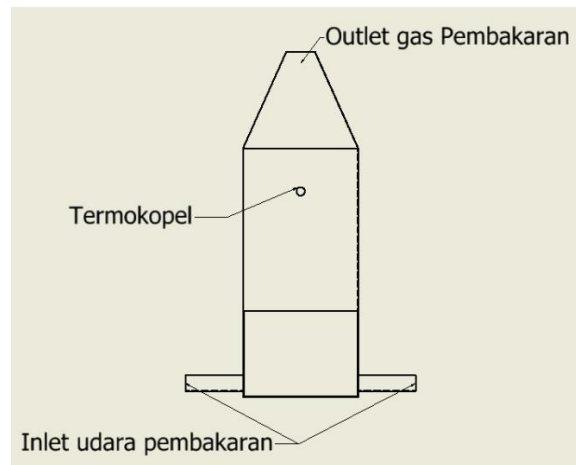
Penelitian ini bertujuan menganalisis suhu pembakaran sampah kering di tungku dan pemanfaatannya sebagai sumber energi proses pengeringan melalui *heat exchanger* pipa. Pendekatan yang digunakan adalah kombinasi eksperimen dan simulasi CFD untuk memahami potensi penggunaan panas pembakaran sebagai sumber panas udara pengeringan.

Metode Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan dengan pendekatan hibrida yang mengintegrasikan pengujian eksperimental dengan simulasi numerik untuk memastikan analisis yang akurat dan berbasis pada kondisi nyata.

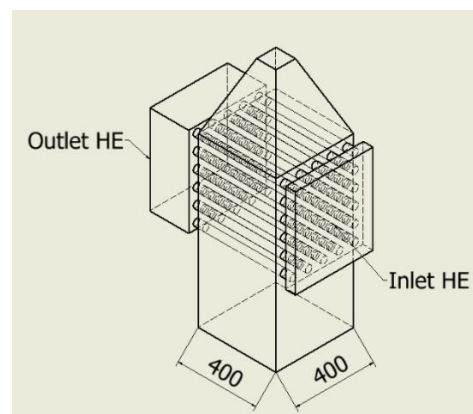
Pertama, tahap eksperimental dilakukan untuk menentukan temperatur operasional dari sumber panas. Sampah kering domestik dengan komposisi yang dijaga konsisten dibakar di dalam sebuah tungku pembakaran seperti pada gambar 2. Setelah proses pembakaran mencapai kondisi nyala api yang stabil, temperatur di dalam ruang bakar diukur menggunakan termokopel Tipe-K. Untuk menjamin validitas dan keandalan data, keseluruhan proses pengujian ini direplikasi sebanyak tiga kali. Hasil dari ketiga pengujian tersebut kemudian diolah untuk mendapatkan nilai temperatur rata-rata ruang bakar, yang

menjadi data acuan fundamental untuk tahap selanjutnya.

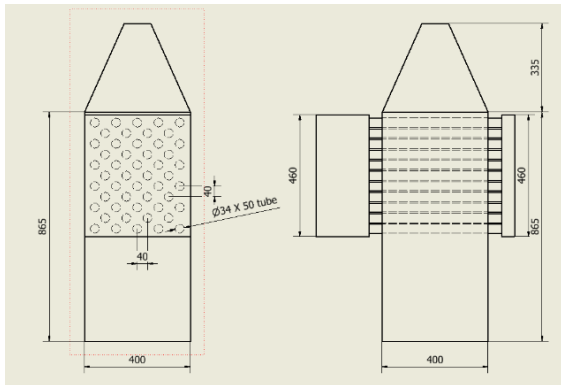


Gambar 1. Tungku pembakaran sampah

Berbekal data temperatur rata-rata dari eksperimen, penelitian dilanjutkan ke tahap simulasi numerik menggunakan perangkat lunak *ANSYS Fluent*. Sebuah model geometri tiga dimensi (3D) yang mereplikasi tungku beserta susunan pipa penukar panas (*heat exchanger*) di dalamnya dibuat menggunakan perangkat lunak CAD. Material untuk pipa penukar panas didefinisikan dalam simulasi sebagai Baja (*Mild Steel*) dengan ketebalan pipa 1 mm. Domain komputasi yang mencakup fluida dan solid ini kemudian di-*meshing* menjadi elemen-elemen kecil, dengan penyempurnaan pada area dekat dinding pipa untuk menangkap fenomena perpindahan panas secara detail.



Gambar 2. Model 3D Tungku pembakaran dengan HE



Gambar 3. Model 3D Tungku pembakaran dengan HE

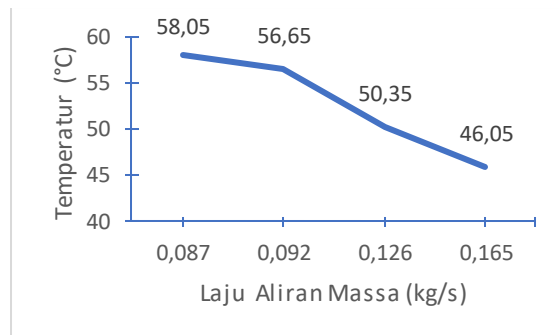
Temperatur rata-rata yang diperoleh dari eksperimen diterapkan sebagai kondisi batas (*boundary condition*) temperatur konstan pada dinding tungku. Udara lingkungan dengan temperatur 30°C didefinisikan sebagai fluida kerja yang mengalir masuk ke dalam pipa penukar panas. Untuk menganalisis pengaruh laju aliran terhadap efektivitas penyerapan panas, simulasi dijalankan dengan empat variasi laju aliran massa yang berbeda, yaitu 0.087, 0.092, 0.126, dan 0.165 kg/s. Model turbulensi k-epsilon ($k-\epsilon$) diaktifkan untuk memodelkan aliran udara yang realistis di dalam pipa. Parameter utama yang menjadi fokus analisis adalah temperatur rata-rata udara pada sisi keluaran (*outlet*) dari sistem penukar panas untuk setiap variasi laju aliran massa.

Hasil dan Pembahasan

Tahap awal penelitian berfokus pada penentuan kondisi termal aktual di dalam tungku dengan melakukan tiga kali pengujian pembakaran sampah kering. Hasil dari serangkaian pengujian tersebut, diperoleh temperatur gas panas yang konsisten, dengan nilai rata-rata terukur sebesar 295.33°C. Nilai tersebut mencerminkan sumber energi termal realistis pada tungku skala laboratorium. Nilai ini digunakan sebagai kondisi batas utama dalam simulasi CFD.

Berdasarkan data eksperimen tersebut, simulasi CFD dijalankan untuk mengevaluasi kinerja sistem penukar panas

(*heat exchanger*) yang dirancang. Udara lingkungan dengan temperatur 30°C dialirkan melalui susunan pipa penukar panas dengan empat variasi laju aliran massa yang berbeda. Hasil simulasi menunjukkan kemampuan sistem untuk memulihkan panas secara efektif, di mana udara berhasil dipanaskan hingga mencapai rentang temperatur antara 46.05°C hingga 58.05°C.



Gambar 4. Hubungan laju aliran massa dengan temperatur keluar HE

Analisis lebih dalam menunjukkan adanya hubungan terbalik yang jelas antara laju aliran massa dengan temperatur udara keluaran. Temperatur tertinggi, 58.05°C, dicapai pada laju aliran massa terendah, yaitu 0.087 kg/s. Seiring dengan meningkatnya laju aliran massa hingga 0.165 kg/s, temperatur keluaran menurun secara bertahap hingga 46.05°C. Fenomena ini dapat dijelaskan oleh konsep waktu tinggal (*residence time*). Pada laju aliran yang lebih rendah, udara bergerak lebih lambat di dalam pipa, memberikannya waktu kontak yang lebih lama dengan permukaan panas untuk menyerap kalor secara maksimal. Sebaliknya, pada laju aliran tinggi, waktu tinggal yang singkat membatasi jumlah energi panas yang dapat diserap oleh setiap unit massa udara.

Suhu keluar maksimum 58,05°C (pada 0,087 kg/s) masuk akal secara fisika meskipun sumber panas hanya 295,33°C. Kenaikan suhu ($\Delta T = 58,05 - 30 = 28,05^\circ\text{C}$) hanya ~9,5% dari selisih suhu tersedia ($295,33 - 30 = 265,33^\circ\text{C}$). Rendahnya pemulihan panas ini wajar karena beberapa hal yaitu : luas perpindahan panas kecil (heat exchanger skala lab), waktu tinggal singkat

meski pada alir rendah, Resistansi konveksi di sisi gas buang dan udara, serta *heat exchanger* yang digunakan tidak menggunakan konfigurasi alir berlawanan (*counterflow*).

Validasi CFD dilakukan dengan membandingkan laju perpindahan panas dari simulasi terhadap perhitungan neraca energi pada laju alir terendah yaitu 0,087kg/s.

$$Q = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T$$

$$Q = 0,087 \text{ kg/s} \cdot 1005 \text{ J/kg.K.} (58.05-30)$$

$$Q = 2452 \text{ Watt}$$

Nilai perhitungan analitik tersebut kemudian dibandingkan dengan data laju perpindahan panas hasil dari simulasi CFD dalam tabel 1.

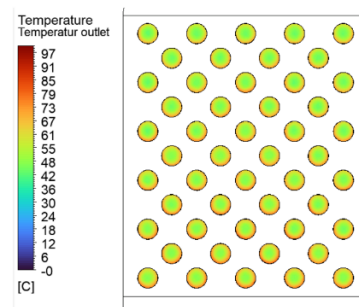
Tabel 1. Laju perpindahan panas hasil simulasi CFD.

No	Laju aliran massa (kg/s)	ΔT (°C)	Laju aliran panas (W)
1	0.087	28.05	2460
2	0.092	26.65	2470
3	0.126	20.35	2580
4	0.165	16.05	5660

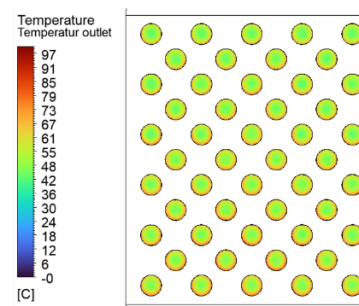
Dari tabel tersebut bahwa perhitungan laju aliran panas secara analitik dan simulasi CFD tidak ada perbedaan secara signifikan sehingga hal ini dapat menjadi acuan bahwa simulasi yang dijalankan dapat mewakili kondisi nyata.

Dari perhitungan laju perpindahan panas, semakin besar laju aliran massa, semakin besar pula panas yang dipindahkan akibat bertambah besarnya koefisien perpindahan panas konveksi. Namun bertambahnya laju aliran massa mengakibatkan penurunan nilai peningkatan temperatur udara dalam *heat exchanger*. Kontur distribusi temperatur

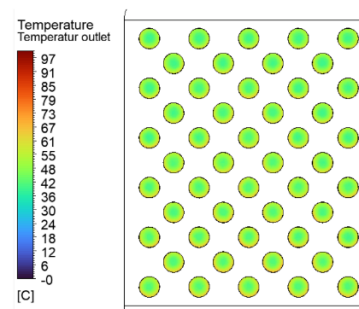
udara keluar *heat exchanger* dapat dilihat pada gambar 5.



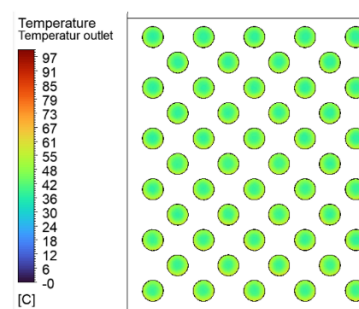
(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 5. Kontur temperatur udara keluar HE (a). 0.087 kg/s, (b). 0.092 kg/s, (c). 0.126 kg/s, (d). 0.165 kg/s

Hal ini mengindikasikan adanya *trade-off* operasional yang penting yaitu laju

aliran rendah lebih diutamakan untuk mencapai temperatur tinggi, sedangkan laju aliran tinggi lebih cocok untuk menghasilkan volume udara hangat yang lebih besar pada temperatur yang lebih rendah. Secara keseluruhan, hasil ini mengonfirmasi bahwa sistem yang diusulkan mampu mengubah panas dari pembakaran sampah menjadi aliran udara panas yang fungsional dan terkontrol untuk aplikasi pengeringan.

Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang menggabungkan pengujian eksperimental dan simulasi numerik, dapat disimpulkan bahwa sistem pemulihan panas dari pembakaran sampah kering ini layak secara teknis untuk aplikasi pengeringan. Data eksperimental menunjukkan bahwa pembakaran sampah mampu menghasilkan gas panas dengan temperatur rata-rata 295.33°C, yang merupakan sumber energi termal yang signifikan. Simulasi CFD mengonfirmasi bahwa panas ini dapat ditransfer secara efektif melalui penukar panas yang dirancang dan berhasil meningkatkan temperatur udara dari 30°C menjadi 46.05°C hingga 58.05°C sesuai dengan variasi laju aliran massa udara. Lebih lanjut, penelitian ini mengungkap bahwa temperatur udara keluaran dapat dikontrol dengan mengatur laju aliran massa, dimana laju aliran yang lebih rendah menghasilkan temperatur yang lebih tinggi. Hasil ini membuktikan potensi besar dari sistem ini sebagai solusi *waste-to-energy* yang praktis untuk menghasilkan udara panas bagi kebutuhan proses pengeringan skala kecil hingga menengah.

Ucapan terimakasih

Penelitian ini dapat terlaksana berkat dukungan pendanaan dari DIPA BLU Universitas Lampung untuk Tahun Anggaran 2025. Penulis mengucapkan terima kasih atas dukungan yang telah memungkinkan penyelesaian penelitian ini.

Referensi

- [1] Traven, L., 2023. Sustainable energy generation from municipal solid waste. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 8(2), 100491.
- [2] Kumar, R., 2025. Sustainable energy recovery from municipal solid wastes. *Journal of Environmental Science and Technology*, 59(2), 123–135.
- [3] EPA, 2025. Energy recovery from the combustion of municipal solid waste. U.S. Environmental Protection Agency.
- [4] Pasek, A. D., Gultom, K. W., & Suwono, A., 2013. Feasibility of recovering energy from municipal solid waste to generate electricity. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 45(3), 241–256.
- [5] Reddy, P. J., 2016. Energy recovery from municipal solid waste by thermal conversion technologies. CRC Press.
- [6] Yan, M., 2021. Numerical investigation of MSW combustion influenced by primary air preheating. *Journal of Hazardous Materials*, 403, 123–134.
- [7] Chen, D., Liu, H., & Zhu, T., 2004. Choices of heat exchanger network for incineration plant fuelled with high water content municipal solid waste. *WIT Transactions on Engineering Sciences*, 46, 1–12.
- [8] Jouhara, H., et al., 2018. Waste heat recovery technologies and applications. *Applied Thermal Engineering*, 132, 1–11.
- [9] Woolley, E., 2018. Industrial waste heat recovery: A systematic approach. *Journal of Cleaner Production*, 172, 1–10.
- [10] Kalfrisa, 2023. Energy recuperators. Kalfrisa. <https://www.kalfrisa.com/wp->

content/uploads/2023/04/Energy-recuperators-catalog.pdf.

- [11] Aziz, N., Piarah, W. H., & Supratomo, W., 2016. Experimental design of compact heat exchanger for waste heat recovery of diesel engine exhaust gases for grain dryers. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 5(3), 464–470.
- [12] Septa, N., 2023. CFD modeling of waste heat recovery on the rotary kiln system. Repository Universitas Sriwijaya.
- [13] Ali, S., 2024. Heat recovery from hot water drainage: CFD simulation. *Energy Reports*, 10, 123–134.
- [14] Jang, J., 2025. Designing a shell-and-tube heat exchanger for waste heat recovery. *Energies*, 18(13), 3262.
- [15] Alkindi, H., Purwanto, Y. A., & Wulandani, D., 2015. Analisis CFD aliran udara panas pada penering tipe rak dengan sumber energi gas buang. *Jurnal Keteknikaan Pertanian*, 3(1), 1–12.
- [16] Saleh, M., 2025. Utilization of industrial machine waste heat for co-generation systems. *International Journal of Health, Economics, and Social Sciences*, 7(2), 992-997.
- [17] Duraivel, B., & Karuppiah, S., 2024. A sustainable waste heat recovery polygenerative system. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 138(3), 1021–1032.
- [18] Sururi, M. R., Dirgawati, M., Rifandi, M. F., Djaenudin, D., & Putra, H. E., 2025. Sustainable energy recovery through hydrothermal co-processing of municipal solid waste and laundry wastewater. *Journal of Ecological Engineering*, 26(7), 206–223.
- [19] Faraj, J., & Murr, R., 2025. Using heat recovered from drain water and exhaust gases to enhance heat pump performance. *International Journal of Thermofluids*, 27(1–2), 101214.
- [20] Pasek, A. D., Gultom, K. W., & Suwono, A., 2013. Feasibility of recovering energy from municipal solid waste to generate electricity. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 45(3), 241–256