

# Rancang Bangun Tungku Biomassa Tipe Heat Exchanger Untuk Pengering Hasil Pertanian

Zulkifli Alif<sup>1\*</sup>, Nadila<sup>2</sup>, Muhammad Anshar<sup>3</sup>, Apollo<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup>Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Ujung Pandang, Makassar 90245, Indonesia  
<sup>\*</sup>E-Mail korespondensi: zulkifli19@gmail.com

**Abstract:** The use of a heat exchanger type biomass furnace in the drying process of agricultural products is an efficient and environmentally friendly solution to replace conventional drying methods that depend on weather conditions. Biomass as a renewable energy source, such as rice husks, corn cobs, and wood waste, has great potential as an alternative fuel. This study aims to design and evaluate the performance of a heat exchanger type biomass furnace used in an agricultural product drying system. The research method includes the stages of equipment design, system assembly, and performance testing by analyzing heat transfer characteristics and the temperature of the drying air produced. The test results show that the furnace is capable of producing drying air temperatures in the range of 40–80°C, which is suitable for drying various agricultural commodities. The use of biomass fuels shows different combustion characteristics. Rice husks burn quickly but are less stable, corn cobs produce more stable combustion with an ash content of about 1–2%, while wood waste provides the most stable combustion with a low ash content of about 0.2–1%. In addition, the heat exchanger system is able to separate combustion gases from the drying air, thereby preventing smoke contamination of the product. This system is also capable of accelerating the drying process by approximately 50% compared to natural drying methods. The results of this study indicate that the heat exchanger type biomass furnace has effective performance and has the potential to be applied as an energy-efficient and environmentally friendly agricultural drying technology, while also supporting the utilization of local biomass waste.

**Keywords:** Rice husks, corn cobs, wood waste, heat exchangers and blowers

**Abstrak:** Penggunaan tungku biomassa tipe heat exchanger dalam proses pengeringan hasil pertanian merupakan solusi yang efisien dan ramah lingkungan untuk menggantikan metode pengeringan konvensional yang bergantung pada cuaca. Biomassa sebagai sumber energi terbarukan seperti sekam padi, tongkol jagung, dan limbah kayu memiliki potensi besar sebagai bahan bakar alternatif. Penelitian ini bertujuan untuk merancang serta mengevaluasi kinerja tungku biomassa tipe heat exchanger yang digunakan pada sistem pengering hasil pertanian. Metode penelitian meliputi tahap perancangan alat, perakitan sistem, serta pengujian kinerja dengan menganalisis karakteristik perpindahan panas dan suhu udara pengering yang dihasilkan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa tungku mampu menghasilkan suhu udara pengering pada rentang 40–80°C yang sesuai untuk proses pengeringan berbagai komoditas pertanian. Penggunaan bahan bakar biomassa menunjukkan karakteristik pembakaran yang berbeda, di mana sekam padi terbakar cepat namun kurang stabil, tongkol jagung menghasilkan pembakaran yang lebih stabil dengan kadar abu sekitar 1–2%, sedangkan limbah kayu memberikan pembakaran paling stabil dengan kandungan abu rendah sekitar 0,2–1%. Selain itu, sistem heat exchanger mampu memisahkan gas pembakaran dari udara pengering sehingga mencegah kontaminasi asap pada produk. Sistem ini juga mampu mempercepat proses pengeringan hingga sekitar 50% dibandingkan metode pengeringan alami. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tungku biomassa tipe heat exchanger memiliki kinerja yang efektif dan berpotensi diterapkan sebagai teknologi pengering hasil pertanian yang hemat energi, ramah lingkungan, dan mendukung pemanfaatan limbah biomassa lokal.

**Kata kunci :** Sekam padi, tongkol jagung, limbah kayu, heat exchanger dan blower

## I. PENDAHULUAN

Penanganan hasil pertanian pascapanen merupakan salah satu aspek penting dalam upaya menjaga mutu dan nilai ekonomi produk pertanian. Produk pertanian umumnya memiliki kadar air tinggi dan mudah rusak akibat aktivitas mikrobiologis, enzimatis, maupun reaksi kimiawi selama penyimpanan [1]. Oleh karena itu, diperlukan proses pengeringan yang efektif untuk mengurangi kadar air hingga batas aman yang dapat memperpanjang umur simpan produk tanpa menurunkan kualitasnya.

Pengeringan merupakan proses pemisahan sebagian besar kandungan air dari bahan menggunakan energi panas [2]. Tujuannya adalah menurunkan kadar air hingga mencapai *water activity*

(aw) yang stabil terhadap lingkungan, sehingga mencegah kerusakan biologis dan kimiawi. Selain memperpanjang umur simpan, pengeringan juga bertujuan mengurangi volume bahan, mempermudah transportasi, dan menekan biaya penyimpanan [3]. Namun demikian, metode pengeringan alami yang mengandalkan sinar matahari masih banyak digunakan oleh petani kecil di Indonesia karena sederhana dan murah, meskipun sangat bergantung pada kondisi cuaca dan membutuhkan waktu yang relatif lama.

Sebagai alternatif yang lebih efisien, teknologi pengering mekanis dengan sumber panas alternatif seperti biomassa mulai banyak dikembangkan. Sistem pengering berbasis biomassa mampu menyediakan sumber panas yang stabil serta memanfaatkan limbah pertanian sebagai bahan bakar terbarukan. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa sistem pengering berbasis biomassa mampu meningkatkan temperatur ruang pengering secara signifikan sehingga mempercepat proses pengeringan berbagai komoditas pertanian [4],[14]. Selain itu, pengembangan sistem pengering modern juga memanfaatkan berbagai teknologi seperti *cooling dehumidification* maupun sistem pengering konveksi untuk meningkatkan efisiensi energi dan menjaga kualitas produk selama proses pengeringan [5].

Salah satu pendekatan yang banyak digunakan adalah penerapan sistem *heat exchanger* pada alat pengering. Sistem ini memungkinkan pemisahan antara gas hasil pembakaran dengan udara pengering sehingga produk pertanian tidak terkontaminasi oleh asap atau partikel pembakaran. Penelitian mengenai pengering hasil panen menunjukkan bahwa penggunaan sistem pemanas tidak langsung (*indirect heating*) mampu menjaga kualitas produk serta meningkatkan efisiensi proses pengeringan [6]. Selain itu, beberapa penelitian terbaru juga melaporkan bahwa pemanfaatan energi buang maupun integrasi sumber panas tambahan pada sistem pengering mampu meningkatkan kinerja termal dan stabilitas suhu pada ruang pengering [7],[15].

Berbagai penelitian terdahulu menunjukkan potensi besar pemanfaatan biomassa sebagai sumber energi alternatif. Anshar *et al.* melaporkan bahwa sekam padi memiliki potensi energi yang cukup besar sebagai bahan bakar biomassa dengan nilai kalor sekitar 13–15 MJ/kg [8]. Awulu *et al.* juga menemukan bahwa berbagai limbah pertanian seperti sekam padi, tongkol jagung, dan limbah kayu memiliki nilai kalor yang kompetitif dan dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi terbarukan yang ekonomis [9]. Selain itu, penelitian oleh Asri menunjukkan bahwa variasi komposisi biobriket batang jagung berpengaruh terhadap nilai kalor pembakaran sehingga dapat meningkatkan efisiensi energi pada proses pembakaran biomassa [10].

Penelitian lain oleh Arisandi dan Aminah memperkuat potensi limbah kayu sebagai bahan bakar biomassa karena memiliki nilai kalor tinggi dan kadar abu yang relatif rendah sehingga efisien dalam proses pembakaran [11]. Selain itu, studi eksperimental mengenai perpindahan panas pada sistem penukar kalor menunjukkan bahwa desain dan konfigurasi *heat exchanger* memiliki pengaruh penting terhadap efisiensi perpindahan panas pada sistem pengering berbasis biomassa [12]. Penelitian terbaru juga menunjukkan bahwa pengembangan sistem pengering berbasis biomassa dengan desain tungku dan penukar panas yang optimal mampu menghasilkan temperatur pengering hingga lebih dari 80°C sehingga proses pengeringan menjadi lebih cepat dan stabil [13],[16].

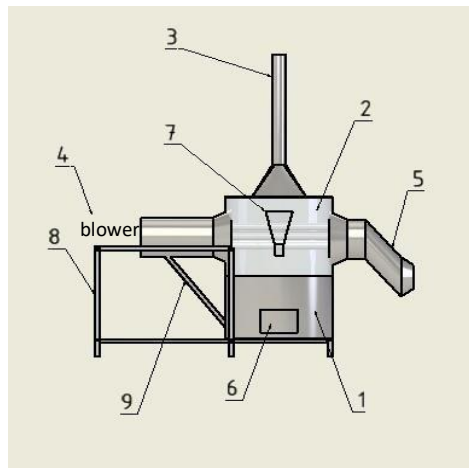
Dengan mempertimbangkan berbagai penelitian tersebut, pengembangan tungku biomassa tipe *heat exchanger* menjadi solusi yang layak untuk sektor pertanian di daerah tropis seperti Indonesia. Sistem ini mampu memanfaatkan sumber daya biomassa lokal seperti sekam padi, tongkol jagung, dan limbah kayu sebagai bahan bakar terbarukan, serta menghasilkan udara panas dengan rentang suhu ideal (40–80°C) untuk pengeringan berbagai hasil pertanian seperti padi, jagung, dan rempah-rempah. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan menguji kinerja tungku biomassa tipe *heat exchanger* untuk mengetahui karakteristik perpindahan panas serta efisiensi sistem dalam proses pengeringan hasil pertanian.

## II. METODE PENELITIAN

### A. Tahap perancangan

Alat yang di rancang adalah tungku biomassa tipe *heat exchanger* untuk pengeringan hasil pertanian. Alat ini dengan membakar biomassa pada ruang pembakaran kemudian memanaskan pipa

penukar kalor yang terletak pada bagian atas pembakaran dengan pipa yang tersusun horizontal sehingga udara pada dalam pipa menjadi panas dan menggunakan drum besi sebagai rangka dasar tungku . Udara panas pada dalam pipa di manfaatkan untuk ke ruang pengeringan dengan bantuan pendorong udara yaitu blower tipe sentrifugal



Gambar 1. perancangan tungku biomassa tipe heat exchanger

Keterangan: 1. Tungku pembakaran 2. Pipa penukar kalor 3. Cerobong asap 4. Penyuplai udara 5. Keluaran udara 6. Pintu tungku pembakaran 7. Corong masukan biomassa 8. Rangka tungku biomassa 9. Saluran udara untuk pembakaran

## B. Tahap perakitan

Perakitan adalah suatu proses penyusunan dalam satu bentuk yang saling mendukung sehingga bentuk mekanisme kerja yang diinginkan bisa terealisasi. Proses perakitan dibagi dalam beberapa tahap pertama sambungkan tungku dengan ruang penukar kalor pada bagian atas menggunakan las kemudian sambungkan penutup tungku dan cerobong asap pada bagian atas ruang penukar kalor kemudian sambungkan saluran udara pada bagian pipa penukar kalor untuk ke blower dan sisi sebelahnya untuk ke ruang pengering terakhir Sambungkan tungku pembakaran dan ruang pengering

## C. Metode perhitungan

Adapun analisis yang akan dihitung menggunakan persamaan menurut [5] berikut:

1. Menghitung Perpindahan Panas Konveksi

$$q = h \cdot A \cdot \Delta T \quad (1)$$

Dimana  $h$ = Koefisien Perpindahan panas Konveksi,  $A$ = Luas Permukaan pipa,  $\Delta T$ = Perbedaan Temperatur

2. Menghitung Perpindahan Panas Konduksi ( $q$ )

$$q = kA \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2)$$

Dimana  $k$  = Konduktivitas Thermal material pipa,  $A$ = Luas Permukaan pipa,  $\Delta T$  = Perbedaan Temperatur,  $\Delta x$ = Ketebalan Material pipa

3. Laju Massa Udara

$$m_i = \rho \cdot v \cdot A \quad (3)$$

Dimana  $m_i$  = Laju aliran massa udara,  $\rho$  = kerapatan udara,  $v$  = kecepatan aliran udara,  $A$  = Luas penampang pipa

4. Laju Aliran Panas Udara

$$Q = m_i \cdot C_p \cdot (T_{in} - T_{out}) \tag{4}$$

Dimana  $m_i$  = Laju Aliran Massa Udara,  $C_p$  = Kapasitas Panas Spesifik udara,  $T_{in}$  = Suhu Udara Masuk pada pipa,  $T_{out}$  = Suhu Udara Keluar pada pipa

5. Luas Penampang pipa

$$A = \pi \cdot d \cdot L \tag{5}$$

Dimana  $\pi$  = Phi,  $d$  = Diameter,  $L$  = Panjang Material

6. Bilangan *Reynolds* (Re)

Untuk Mengetahui Jenis aliran digunakan persamaan Bilangan *Reynolds* dapat ditentukan sebagai berikut:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} \tag{6}$$

Dimana  $Re$  = Bilangan Reynolds,  $\rho$  = densitas fluida ( $\text{kg/m}^3$ ),  $v$  = kecepatan rata-rata fluida (m/s),  $D$  = diameter pipa,  $\mu$  = viskositas fluida ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$  atau  $\text{N}\cdot\text{s/m}^2$ )

7. Bilangan Nusselt (Nu)

Bilangan Nusselt dapat ditentukan dengan persamaan berikut :

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \tag{7}$$

Dimana  $Nu$  = Bilangan *Nusselt*,  $Re$  = Bilangan *Reynolds*,  $Pr$  = Bilangan *Prandtl*.

Menurut [3][4] Nilai 0,023 merupakan ketetapan dalam rumus bilangan Nusselt. Sedangkan 0,4 menunjukkan aliran fluida yang mengalir dalam tube (fluida panas).

8. Koefisiensi perpindahan panas (h)  $Nu \cdot k$

$$h = \frac{Nu \cdot k}{D} \tag{8}$$

Dimana  $h$  = koefisiensi perpindahan panas,  $Nu$  = bilangan Nusselt,  $k$  = konduktivitas thermal,  $D$  = diameter pipa

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### A. Hasil Perancangan alat



Gambar 2. Hasil perancangan alat tungku bioassay tipe heat exchanger

Proses pembuatan tungku biomassa tipe heat exchanger untuk pengering hasil pertanian dimulai dengan mendesain dan mempersiapkan alat dan bahan, kemudian dilanjutkan dengan proses perakitan sesuai desain seperti pada gambar.

### **B. Karakteristik bahan bakar Sekam padi**

Kandungan silika yang tinggi membuat sekam padi berbeda dari biomassa lainnya, karena silika tidak mudah terbakar dan dapat mempengaruhi proses pembakaran. Sekam padi segar bisa memiliki kandungan air sekitar 1015%, tetapi harus dikeringkan terlebih dahulu untuk efisiensi pembakaran. Sekam padi memiliki kepadatan yang sangat rendah, dengan berat jenis berkisar antara 90–150 kg/m<sup>3</sup>. Artinya, volume yang besar menghasilkan sedikit massa. Biomassa dengan kepadatan rendah cenderung menghasilkan lebih sedikit panas per unit volume. Karena kepadatannya yang rendah, sekam padi membutuhkan ruang penyimpanan yang lebih besar jika dibandingkan dengan bahan bakar lain, seperti kayu atau batu bara. Sekam padi memiliki nilai kalor sekitar 13–15 MJ/kg, yang tergolong rendah dibandingkan biomassa lain. Ini disebabkan oleh kandungan silika yang tinggi dan kepadatan yang rendah. Meskipun cepat terbakar, panas yang dihasilkan per kilogramnya relatif kecil.

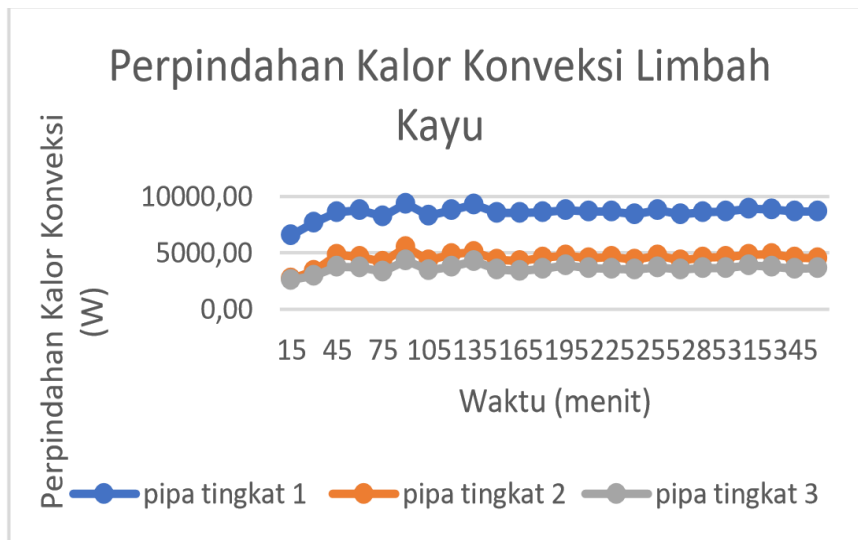
### **Tongkol jagung**

Tongkol jagung memiliki nilai kalor sekitar 16–18 MJ/kg (Megajoule per kilogram), yang menempatkannya di antara sekam padi dan kayu. Nilai kalor ini cukup baik untuk dijadikan bahan bakar biomassa, terutama dalam skala rumah tangga atau industri kecil. Dengan nilai kalor yang lebih tinggi dibandingkan sekam padi, tongkol jagung bisa menghasilkan panas yang lebih optimal dan stabil dalam proses pembakaran. Tongkol jagung mudah terbakar dan menghasilkan panas dengan laju yang cukup baik. Karena kandungan volatile matter yang tinggi, proses pembakaran bisa berlangsung cepat dan efisien. Stabilitas Pembakaran tongkol jagung terbakar lebih stabil dibandingkan sekam padi. Ini membuatnya cocok untuk digunakan dalam sistem pembakaran berkelanjutan, seperti tungku atau boiler biomassa. Kandungan abu tongkol jagung relatif rendah, sekitar 1–2%, yang artinya pembakaran menghasilkan sedikit sisa abu, sehingga efisiensi energi dapat lebih tinggi.

### **Limbah kayu**

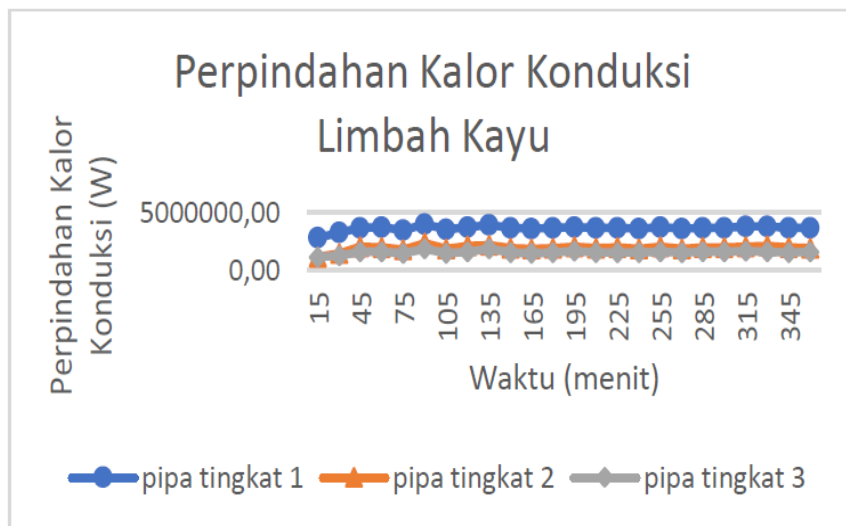
Kandungan abu limbah kayu umumnya rendah, sekitar 0.2–1%, yang membuatnya efisien sebagai bahan bakar karena hanya menghasilkan sedikit sisa abu. Kayu dapat terbakar lebih lambat dan menghasilkan panas yang stabil, sehingga sering digunakan dalam pembakaran berkelanjutan, seperti tungku atau kompor biomassa. Kayu yang lebih padat menghasilkan lebih banyak energi per unit volume, membuatnya efisien sebagai bahan bakar. Karena kepadatan tinggi, limbah kayu juga lebih efisien dalam penyimpanan dan transportasi dibandingkan biomassa yang lebih ringan, seperti sekam padi atau tongkol jagung. Limbah kayu memiliki efisiensi pembakaran tinggi, terutama jika sudah dikeringkan dengan baik. Kayu kering akan terbakar lebih lama dan memberikan panas yang konsisten, sehingga banyak digunakan dalam pemanas rumah atau pengeringan industri. Pembakaran limbah kayu menghasilkan sedikit abu, yang membuatnya lebih mudah untuk dipelihara dibandingkan bahan bakar biomassa lainnya yang menghasilkan lebih banyak residu.

### **C. Karakteristik heat exchanger**



Gambar 3. Perpindahan kalor konveksi limbah kayu

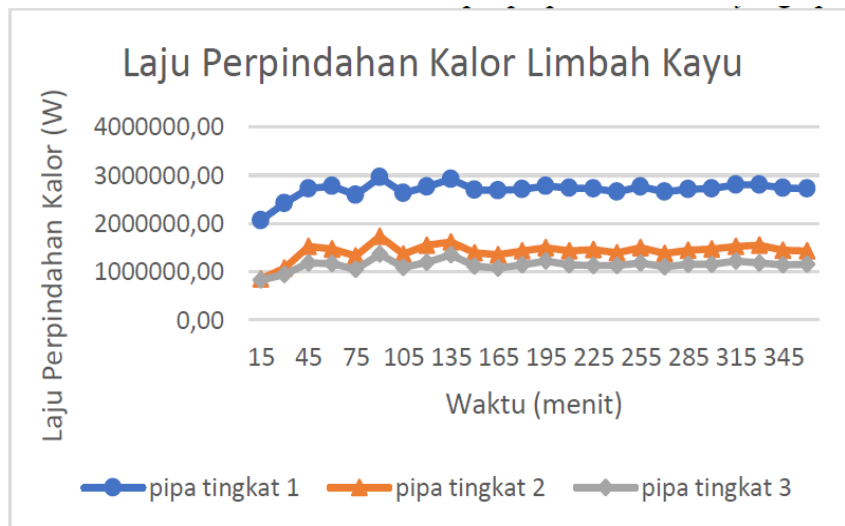
Gambar 3 menunjukkan pada awal proses (15 menit), terjadi lonjakan signifikan pada perpindahan kalor di tingkat 1, sementara tingkat 2 dan tingkat 3 menunjukkan pola yang relatif stabil. Setelah lonjakan awal tersebut, perpindahan kalor pada tingkat 1 mengalami penurunan tajam hingga sekitar 30 menit, kemudian stabil dan sedikit berfluktuasi sepanjang waktu pengamatan. Pola ini menunjukkan bahwa tingkat 1 mengalami perpindahan kalor yang lebih intensif pada awal proses, tetapi kemudian mencapai kesetimbangan setelah waktu tertentu.



Gambar 4. Perpindahan kalor konduksi limbah kayu

Gambar 4 menunjukkan setelah penurunan di awal, semua tingkat mencapai kondisi yang lebih stabil, dengan tingkat 1 tetap memiliki perpindahan kalor tertinggi dibandingkan tingkat 2 dan 3. Tingkat 2 dan 3 menunjukkan perpindahan kalor yang mirip, namun sedikit lebih rendah, dan fluktuasi yang terjadi lebih kecil. Hal ini menunjukkan bahwa panas lebih efektif berpindah pada tingkat 1 dibandingkan pada tingkat 2 dan 3. Perbedaan ini mungkin disebabkan oleh faktor-faktor seperti jarak dari sumber panas, variasi dalam sifat termal material, dan posisi pipa dalam sistem. Tingkat 1 kemungkinan berada lebih dekat dengan sumber panas, sehingga perpindahan kalor lebih cepat terjadi,

sementara tingkat 2 dan 3 memerlukan waktu lebih lama untuk mencapai perpindahan kalor yang optimal.



Gambar 5. Laju perpindahan kalor limbah kayu

Gambar 5 menunjukkan Pada Tingkat 1, laju perpindahan kalor dimulai dengan nilai yang cukup tinggi dan stabil dibandingkan dengan tingkat lainnya. Grafik ini menunjukkan bahwa perpindahan kalor pada Tingkat 1 mengalami sedikit fluktuasi di awal, namun tetap berada pada laju yang relatif lebih tinggi sepanjang waktu pengamatan. Hal ini mengindikasikan bahwa perpindahan kalor pada tingkat pertama lebih optimal dibandingkan dengan tingkat yang lebih tinggi.

#### IV. KESIMPULAN

1. Sekam padi membakar cepat tapi tidak efisien karena kandungan silika yang tinggi dan menghasilkan panas yang kurang optimal. Pembakarannya sering tidak stabil, dengan banyak sisa abu. Pembakaran Tongkol jagung stabil dan efisien dan menghasilkan panas yang cukup stabil, dengan jumlah abu yang lebih sedikit dibandingkan sekam padi, sekitar 1-2 %. Tongkol jagung memiliki kepadatan yang lebih baik dari pada sekam padi, sehingga lebih efisien untuk penyimpanan dan transportasi. Pembakaran Limbah kayu terbakar lebih lambat, menghasilkan panas yang stabil dan terus-menerus, ideal untuk penggunaan yang berkelanjutan dalam tungku atau boiler. Limbah kayu terutama kayu keras, memiliki kepadatan yang tinggi, sehingga lebih efisien dalam penyimpanan, transportasi, dan pembakaran. Limbah kayu menghasilkan abu sangat sedikit, sekitar 0.2–1%, membuatnya lebih efisien dan mudah dikelola dibandingkan dengan sekam padi dan tongkol jagung.
2. Performa tungku biomassa yang dirancang dinilai berdasarkan efisiensi perpindahan panas. Dengan mengukur parameter seperti laju aliran udara, suhu ruang pembakaran, dan suhu udara pengering, penelitian menunjukkan bahwa tungku mampu mengoptimalkan proses pengeringan, terutama di kondisi cuaca yang kurang mendukung, seperti saat musim hujan.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Cahyawan, *Buku Petunjuk Praktikum Teknik Pengolahan Hasil Pertanian*. Mataram: Universitas Mataram Press, 2010.
- [2] A. Anton and Irawan, *Modul Laboratorium Pengeringan*. Banten: Sultan Ageng Tirtayasa Press, 2011.

- [3] Y. A. Çengel and J. M. Cimbala, *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*, 3rd ed. New York: McGraw-Hill Education, 2013.
- [4] A. W. Nugraha, B. Susilo, dan S. Suryanto, “Rancang bangun alat pengering hasil pertanian berbasis biomassa untuk meningkatkan efisiensi proses pengeringan,” *Jurnal Teknologi Pertanian*, vol. 22, no. 2, pp. 123–132, 2021.
- [5] S. H. Prasetyo, M. Djaeni, dan A. P. Nugroho, “Pengembangan sistem pengering hasil pertanian berbasis dehumidifikasi untuk meningkatkan efisiensi energi,” *Rekayasa Mesin*, vol. 13, no. 1, pp. 45–52, 2022.
- [6] R. Kurniawan dan A. S. Wibowo, “Analisis kinerja alat pengering hasil pertanian dengan sistem pemanas tidak langsung (*indirect heating*),” *Jurnal Rekayasa Proses*, vol. 16, no. 1, pp. 11–18, 2022.
- [7] M. F. Hidayat, A. Nugroho, dan R. Yuliani, “Analisis performa sistem pengering biomassa dengan pemanfaatan panas buang,” *Jurnal Energi dan Manufaktur*, vol. 16, no. 2, pp. 85–92, 2023.
- [8] M. Anshar, F. N. Ani, and A. S. Kader, “Electrical Energy Potential of Rice Husk as Fuel for Power Generation in Indonesia,” *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 11, no. 6, pp. 3616–3624, 2016.
- [9] J. Awulu, P. Omale, and J. Ameh, “Comparative Analysis of Calorific Values of Selected Agricultural Waste,” *Nigerian Journal of Technology*, vol. 37, no. 4, pp. 1163–1168, 2018.
- [10] S. Asri, “Efisiensi Konsentrasi Perikat Tepung Tapioka terhadap Nilai Kalor Pembakaran pada Biobriket Batang Jagung (*Zea mays L.*),” *Jurnal Teknosains*, vol. 7, no. 2, pp. 78–89, 2013.
- [11] H. Arisandi dan S. Aminah, “Pemanfaatan limbah kayu praktikum dan penelitian untuk pembuatan cuka kayu sebagai bahan hand sanitizer,” *Jurnal Rekayasa Material dan Energi Terbarukan*, vol. 2, no. 1, pp. 45–52, 2021.
- [12] M. R. Bahi, “Studi eksperimental perpindahan panas secara konveksi paksa pada pipa tembaga berbentuk segitiga,” Tugas Akhir, Universitas Sriwijaya, Palembang, 2022.
- [13] K. Burhani, Ramelan, and R. N. Fitri, “Pengembangan media pembelajaran perpindahan panas radiasi dengan variasi perlakuan permukaan spesimen uji,” *Jurnal Mechanical Engineering Learning*, vol. 3, no. 2, pp. 86–93, 2014.
- [14] D. A. Saputra dan M. Djaeni, “Pengembangan sistem pengering hasil pertanian berbasis biomassa untuk meningkatkan efisiensi energi,” *Jurnal Teknologi Pertanian*, vol. 24, no. 1, pp. 45–53, 2023.
- [15] A. Setiawan, B. Susilo, dan R. Yulianingsih, “Analisis kinerja alat pengering jagung berbasis tungku biomassa pada skala petani,” *Jurnal Keteknikaan Pertanian*, vol. 11, no. 2, pp. 95–103, 2022.
- [16] M. A. Firmansyah dan A. Nugroho, “Analisis performa *heat exchanger* pada sistem pengering hasil pertanian berbasis biomassa,” *Jurnal Rekayasa Energi Manufaktur*, vol. 18, no. 1, pp. 33–40, 2024.