



Studi eksperimental penggunaan limbah aluminium sebagai media penyimpan energi panas pada alat pengering skala laboratorium

Experimental study on the use of aluminum waste as a heat energy storage medium in laboratory-scale drying equipment

Nanang Apriandi^{1*}, Avicenna An-Nizhami¹, Yusuf Dewantoro Herlambang¹, Rani Raharjanti², Iqo Yovie Rachman³, Sigit Suseno³, Hilma Khoirunnisa³, Atina Nurul Khusna⁴

¹Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Semarang, Indonesia

²Jurusan Akuntansi, Politeknik Negeri Semarang, Indonesia

³Program Studi Teknik Konversi Energi, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Semarang, Indonesia

⁴Program Studi Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Semarang, Indonesia

*corresponding author: nanang.apriandi@polines.ac.id

Received: 13rd September, 2024 | accepted: 28th October, 2024

ABSTRAK

Pengeringan merupakan metode penting dalam mengurangi kehilangan hasil pertanian, namun tantangan utamanya adalah efisiensi energi. Penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi penggunaan limbah aluminium sebagai material penyimpan energi panas (Thermal Energy Storage/TES) dalam alat pengering skala laboratorium. Limbah aluminium berbentuk chips digunakan sebagai TES untuk menstabilkan temperatur ruang pengering, sehingga meningkatkan efisiensi energi. Metode eksperimen melibatkan pengujian alat pengering pada dua kondisi operasi: tanpa dan dengan penambahan TES. Pengukuran dilakukan untuk memantau temperatur ruang pengering, temperatur udara keluar, dan kelembaban relatif (RH). Sistem diuji dalam dua fase, yaitu charging (penyerapan panas) dan discharging (pelepasan panas), dengan data yang diakuisisi menggunakan thermocouple dan sistem akuisisi data. Hasil menunjukkan bahwa penambahan TES mampu mengurangi penurunan temperatur ruang pengering sebesar 10,59%, dibandingkan dengan 25,56% pada sistem tanpa TES. Kelembaban relatif (RH) juga lebih tinggi pada sistem dengan TES, yang membantu menjaga kualitas pengeringan produk. Integrasi TES berbahan limbah aluminium terbukti efektif dalam mengurangi fluktuasi temperatur dan meningkatkan stabilitas proses pengeringan. Penelitian ini menunjukkan bahwa limbah aluminium dapat dimanfaatkan sebagai material TES alternatif yang ramah lingkungan dan ekonomis. Penggunaan TES memberikan solusi berkelanjutan dalam teknologi pengeringan dan memiliki potensi

aplikasi luas di berbagai industri. Penelitian lanjutan disarankan untuk menguji material TES lain dari limbah industri dan mengembangkan analisis efisiensi energi lebih lanjut.

Kata kunci: efisiensi energi; limbah aluminium; pengeringan, TES, thermal energy storage

ABSTRACT

Drying is a crucial method for reducing agricultural product losses, yet its main challenge lies in energy efficiency. This study aims to explore the use of aluminum waste as a thermal energy storage (TES) material in laboratory-scale drying equipment. We employed aluminum waste, in the form of chips, as TES to stabilize the drying chamber temperature, thereby enhancing energy efficiency. The experimental method involved testing the drying equipment under two operating conditions: without and with the addition of TES. We monitored the drying chamber temperature, outlet air temperature, and relative humidity (RH). We tested the system in two phases, charging (heat absorption) and discharging (heat release), using thermocouples and a data acquisition system to acquire data. The results showed that the addition of TES reduced the temperature drop in the drying chamber by 10,59%, compared to 25,56% in the system without it. The relative humidity (RH) was also higher in the system with TES, helping to preserve product drying quality. The integration of aluminum waste-made TES effectively reduced temperature fluctuations and enhanced the drying process's stability. This research reveals the potential of aluminum waste as an environmentally friendly and cost-effective alternative TES material. The use of TES provides a sustainable solution for drying technology and has potential applications across various industries. We recommend further research to test other TES materials derived from industrial waste and to conduct more detailed energy efficiency analyses.

Keywords: energy efficiency; aluminum waste; drying, TES, thermal energy storage

PENDAHULUAN

PENDAHULUAN

Pengeringan adalah salah satu metode paling efektif untuk memperpanjang umur simpan hasil pertanian, perkebunan, dan perikanan. Dengan mengurangi kadar air pada produk, pengeringan secara signifikan menekan potensi pembusukan akibat mikroorganisme dan degradasi kimia, sehingga menjaga kualitas dan nilai ekonomis produk tersebut (Andharia et al., 2023; Apriandi, Herlambang, et al., 2023; Apriandi, Kristiawan, et al., 2023; Murali et al., 2023; Tanggasari et al., 2023). Seiring dengan perkembangan teknologi, metode pengeringan tradisional yang bergantung pada sinar

matahari telah banyak tergantikan oleh sistem pengering mekanis yang lebih efisien, higienis, dan tidak tergantung pada kondisi cuaca. Namun, tantangan utama dalam penggunaan sistem pengering mekanis adalah tingginya konsumsi energi sebagai sumber panas, yang berdampak langsung pada biaya operasional dan jejak karbon (Apriandi et al., 2022).

Untuk mengatasi masalah ini, berbagai upaya telah dilakukan untuk meningkatkan efisiensi energi dalam sistem pengering. Salah satu solusi yang telah terbukti efektif adalah penggunaan *Thermal Energy Storage (TES)* dalam sistem pengering (Apriandi et al., 2022; Cetina-Quiñones et al., 2023; Ekka & Kumar, 2023; Gilago et al., 2023). TES

berfungsi menyimpan energi panas selama proses pemanasan (*charging*) dan melepaskan energi tersebut secara bertahap selama proses pendinginan (*discharging*), sehingga mengurangi fluktuasi temperatur dan memperpanjang durasi operasi tanpa penambahan energi eksternal. Berbagai material telah diuji sebagai media TES, termasuk batu kerikil, parafin, cairan berubah fase, dan lainnya, yang masing-masing memiliki keunggulan dan kelemahan (Andharia et al., 2023; Apriandi et al., 2022; Bhavsar & Patel, 2023; Chaatouf et al., 2023; Dutta et al., 2024; Mathew et al., 2023; Mugi et al., 2024; Murali et al., 2023; Sehwat et al., 2023; Tawalbeh et al., 2023; Yüksel et al., 2024).

Aluminium adalah salah satu material yang menarik untuk digunakan sebagai TES karena memiliki konduktivitas termal yang tinggi, harga yang relatif murah, serta mudah didapat, terutama dalam bentuk limbah industri hasil proses permesinan. Limbah aluminium yang tidak termanfaatkan ini berpotensi menjadi material TES yang efisien dan ramah lingkungan. Penggunaan limbah industri sebagai TES tidak hanya menawarkan solusi untuk meningkatkan efisiensi energi, tetapi juga berkontribusi pada pengurangan limbah padat, sehingga mendukung keberlanjutan lingkungan.

Penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi potensi penggunaan limbah aluminium sebagai media TES yang diintegrasikan ke dalam alat pengering skala laboratorium. Penelitian ini berfokus pada karakteristik termal dari sistem pengering dengan dan tanpa

penambahan TES, serta mengevaluasi dampaknya terhadap efisiensi energi dan kinerja pengering secara keseluruhan. Dengan demikian, penelitian ini memberikan kontribusi penting terhadap pengembangan teknologi pengering yang lebih efisien dan berkelanjutan melalui pemanfaatan limbah industri.

METODOLOGI

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan mengevaluasi performa termal sistem pengering skala laboratorium yang diintegrasikan dengan *Thermal Energy Storage* (TES) berbahan dasar limbah aluminium dalam bentuk *chips*. Pengujian eksperimen yang dilakukan di Laboratorium Konversi Energi, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Semarang bertujuan untuk membandingkan karakteristik termal sistem pengering tanpa dan dengan penambahan TES, terutama dalam hal perubahan temperatur dan kelembaban relatif (*Relative Humidity/RH*).

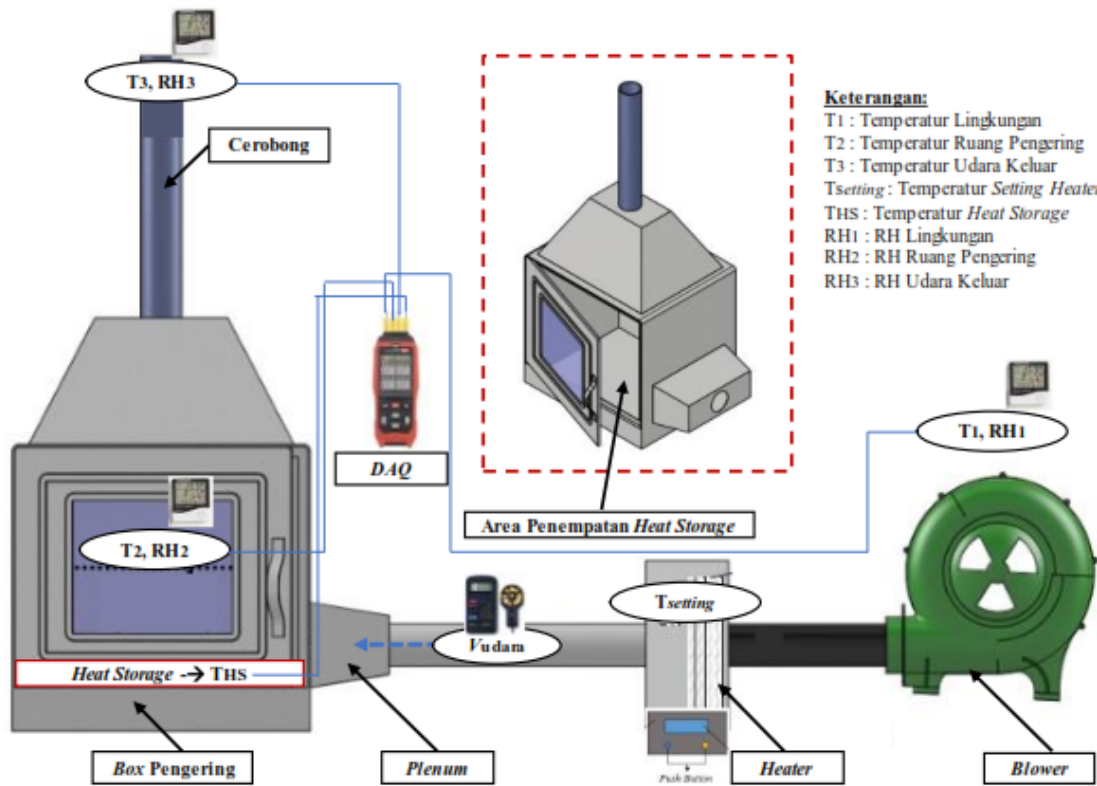
1. Alat dan Bahan

Sistem pengering yang digunakan terdiri dari beberapa komponen utama, seperti ditunjukkan pada **Gambar 1**, yaitu: (1) *Blower*, sebagai penyuplai udara panas ke ruang pengering; (2) *Heater*, sebagai sumber panas; (3) Ruang pengering, yang dilengkapi dengan rak-rak tempat penempatan bahan yang dikeringkan; (4) Pipa saluran udara, yang menghubungkan *blower* ke ruang pengering; (5) Ruang *plenum*, yang berfungsi untuk menyamakan distribusi udara panas; dan (6)

Cerobong, sebagai tempat keluarnya udara panas setelah melewati ruang pengering.

Material TES yang digunakan adalah limbah aluminium hasil dari proses

permesinan, berbentuk *chips*, dengan massa total sebesar 250 gram. Material TES ini dipilih karena memiliki sifat konduktivitas termal yang tinggi, murah, dan mudah didapatkan.



Gambar 1. Skematik sistem pengujian

2. Prosedur Pengujian

Pengujian dilakukan dalam dua tahap, yaitu tanpa penambahan TES dan dengan penambahan TES. Pada kedua kondisi, pengujian dilakukan selama 180 menit yang dibagi menjadi dua fase, yaitu: (1) fase *charging* (120 menit), dimana udara panas disuplai ke ruang pengering menggunakan *blower* dan *heater*.

Pada fase ini, material TES menyerap panas dari udara yang mengalir melalui ruang pengering; dan (2) fase *discharging* (60 menit), dimana *heater* dimatikan, dan udara panas berhenti disuplai. Pada fase ini, TES melepaskan panas yang tersimpan untuk mempertahankan temperatur ruang pengering. Adapun temperatur yang diukur meliputi

temperatur ruang pengering, temperatur udara keluar ruang pengering, dan temperatur *ambient* (sekitar).

Pengukuran dilakukan menggunakan *thermocouple* tipe K dengan rentang pengukuran -200°C hingga 1372°C dan akurasi $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ hingga $\pm 0.7^{\circ}\text{C}$. *Thermocouple* dihubungkan ke sistem akuisisi data (DAQ model TASI TA612C) untuk merekam perubahan temperatur selama pengujian. Selain itu, *thermo hygrometer* digunakan untuk mengukur kelembaban relatif (RH) dengan akurasi $\pm 5\%$, dan *anemometer* digunakan untuk mengukur kecepatan udara yang masuk ke ruang pengering.

3. Analisis Data

Data yang diperoleh dianalisis untuk mengidentifikasi perbedaan performa termal antara sistem dengan dan tanpa TES. Fokus utama analisis adalah penurunan temperatur rata-rata pada fase *discharging*, yang menunjukkan kemampuan TES dalam menyimpan dan melepaskan panas. Selain itu, kelembaban relatif dianalisis untuk mengevaluasi kualitas pengeringan dan kestabilan temperatur dalam sistem.

Perhitungan efisiensi energi dilakukan dengan membandingkan tren perubahan temperatur dan waktu pengoperasian sistem dalam kedua kondisi. Hasil pengujian dibandingkan dengan literatur sebelumnya untuk menilai keunggulan limbah aluminium

sebagai material TES dibandingkan dengan material TES lainnya.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi performa sistem pengering dengan dan tanpa penambahan material *Thermal Energy Storage* (TES) berupa limbah aluminium dalam bentuk *chips*. Analisis performa didasarkan pada perubahan temperatur ruang pengering, temperatur udara keluar, serta kelembaban relatif (RH). Penelitian ini difokuskan pada dua tahap operasi utama, yaitu *charging* (penyerapan panas oleh TES) dan *discharging* (pelepasan panas oleh TES).

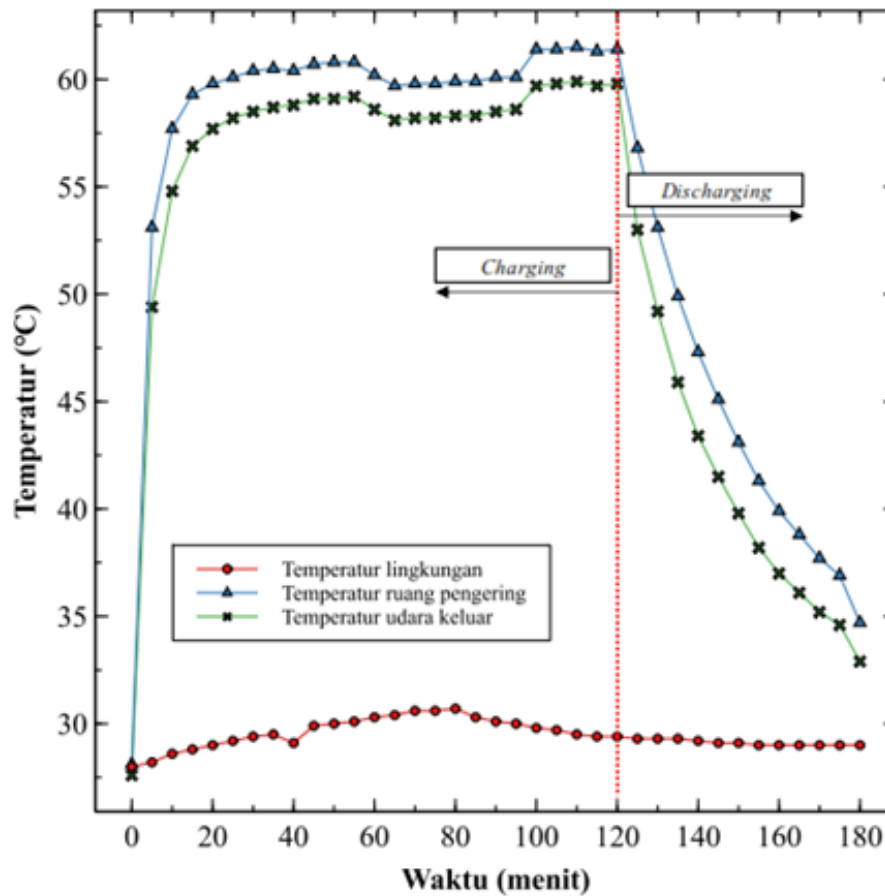
1. Karakteristik Temperatur pada Sistem Pengering

Gambar 2 dan **Gambar 3** menunjukkan tren karakteristik temperatur pada sistem pengering tanpa dan dengan penambahan material TES. Pada pengujian tanpa TES, temperatur rata-rata ruang pengering selama proses *charging* adalah $58,73^{\circ}\text{C}$, sedangkan pada proses *discharging* mengalami penurunan hingga $43,72^{\circ}\text{C}$, dengan penurunan temperatur rata-rata sebesar $25,56\%$.

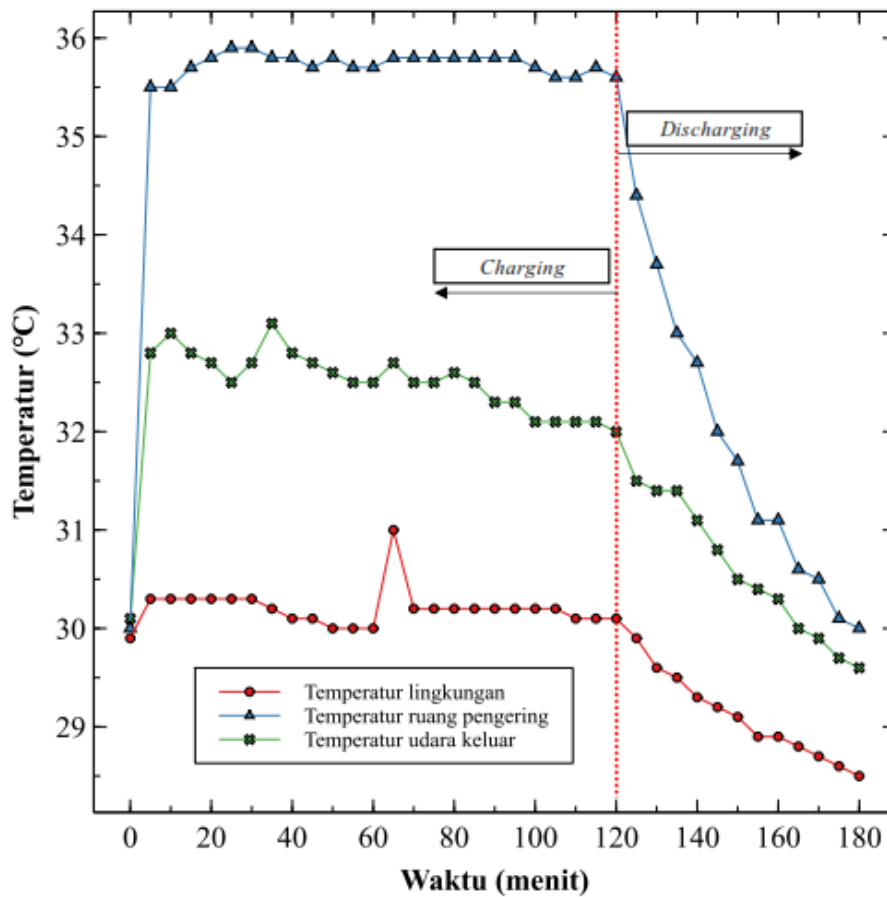
Sebaliknya, pada pengujian dengan penambahan TES, temperatur rata-rata ruang pengering selama proses *charging* tercatat lebih rendah, yaitu $35,55^{\circ}\text{C}$, dan saat proses *discharging*, temperatur ruang pengering turun menjadi $31,74^{\circ}\text{C}$, dengan penurunan temperatur rata-rata yang lebih kecil

yaitu 10,59%. Data ini menunjukkan bahwa material TES mampu menstabilkan temperatur ruang pe-

ngering dan mengurangi fluktuasi temperatur yang terjadi antara tahap *charging* dan *discharging*.



Gambar 2. Karakteristik temperature sistem pengeringan tanpa penambahan TES



Gambar 3. Karakteristik temperature sistem pengering dengan penambahan TES

Penurunan persentase temperatur yang lebih kecil pada sistem dengan TES dapat dijelaskan oleh sifat konduktivitas termal aluminium yang tinggi, yang memungkinkan material menyerap dan menyimpan energi panas secara efisien selama proses *charging*. Pada tahap *discharging*, energi panas yang tersimpan di dalam material TES dilepaskan kembali secara bertahap, sehingga memperlambat penurunan temperatur pada ruang pengering. Hasil ini selaras dengan

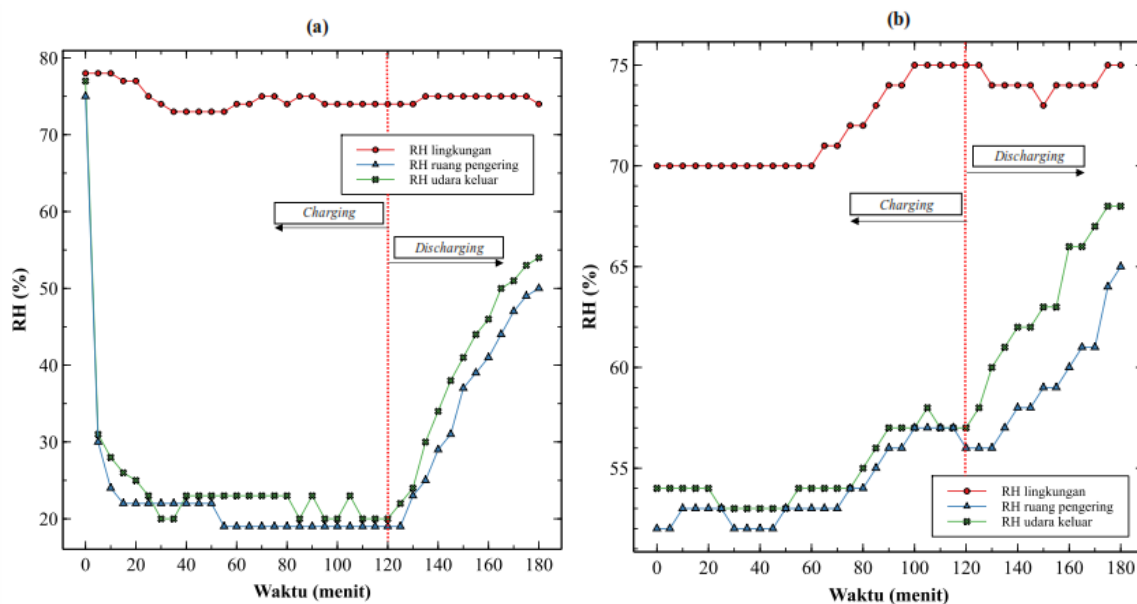
penelitian oleh Mathew et al. (Mathew et al., 2023), di mana penggunaan medium TES berbasis cairan juga mampu me-ngurangi penurunan temperatur yang signifikan pada proses pengeringan.

2. Karakteristik Kelembaban Relatif (RH)

Selain temperatur, RH juga menjadi indikator kinerja penting pada sistem pengering. Dari **Gambar 4.**(a dan b), pada sistem tanpa penambahan

TES, rata-rata RH ruang pengering adalah 27,16%, sedangkan pada sistem dengan TES, RH meningkat menjadi 55,73%. Kenaikan signifikan ini disebabkan oleh perbedaan temperatur ruang pengering, di mana sistem dengan TES mempertahankan temperatur yang lebih rendah selama proses

pengeringan, yang menyebabkan kandungan uap air lebih tinggi di udara pengering. Seperti yang diungkapkan oleh Sudirman et al. (Sudirman et al., 2023), temperatur yang lebih rendah cenderung mempertahankan RH yang lebih tinggi di dalam sistem pengering.



Gambar 4. Karakteristik RH sistem pengering: a) tanpa penambahan TES; dan b) dengan penambahan TES

Kelembaban relatif (RH) yang lebih tinggi dalam sistem dengan TES ini memiliki implikasi penting terhadap kualitas pengeringan. Dalam konteks pengeringan produk pertanian atau bahan pangan, tingkat kelembaban yang terkontrol dan stabil sangat penting untuk menjaga kualitas produk akhir, terutama dalam menjaga tekstur dan kadar air yang diinginkan.

3. Pengaruh Material TES Terhadap Performansi Sistem Pengering

Penambahan material TES berbahan dasar limbah aluminium menghasilkan dampak signifikan terhadap performa termal sistem pengering. Dengan membandingkan tren penurunan temperatur antara sistem tanpa TES dan dengan TES, terlihat bahwa sistem dengan TES mengalami penurunan temperatur yang lebih lambat dan stabil. Secara keseluruhan, pengurangan fluktuasi temperatur ini merupakan faktor penting dalam mengoptimalkan proses pengeringan, khususnya untuk produk yang sensitif terhadap perubahan temperatur yang drastis. Aluminium, dengan sifat termal yang baik, memberikan kontribusi positif dalam penyimpanan dan pelepasan energi panas. Penggunaan aluminium sebagai material TES juga memiliki keunggulan dari segi biaya dan ketersediaan. Limbah aluminium yang digunakan dalam

penelitian ini merupakan hasil sampingan dari proses permesinan, yang biasanya tidak termanfaatkan. Dengan memanfaatkan limbah tersebut, penelitian ini memberikan kontribusi positif terhadap upaya keberlanjutan energi dan pengurangan limbah industri.

4. Efisiensi Energi Pengeringan

Selain evaluasi kinerja termal, perlu dilakukan perhitungan efisiensi energi secara kuantitatif untuk membandingkan sistem dengan dan tanpa TES. Secara hipotetis, energi yang tersimpan di dalam material TES selama proses *charging* dapat dihitung menggunakan persamaan konduksi panas, di mana kapasitas panas spesifik aluminium dan massa material TES menjadi faktor penting dalam mengestimasi jumlah energi yang tersimpan. Berdasarkan data eksperimen, penurunan temperatur yang lebih lambat pada sistem dengan TES menunjukkan bahwa energi panas yang dilepaskan oleh TES secara signifikan mengurangi beban kerja sistem pemanas selama proses *discharging*.

Poin penting yang dapat ditarik dari temuan ini adalah bahwa penambahan TES dapat meningkatkan efisiensi energi pengeringan secara keseluruhan, baik dari segi konsumsi energi maupun stabilitas temperatur. Hal ini sesuai dengan penelitian

sebelumnya oleh Yüksel et al. (Yüksel et al., 2024), yang menunjukkan bahwa sistem pengering dengan TES mampu memperpanjang durasi operasi tanpa tambahan sumber energi eksternal setelah proses *charging* selesai.

SIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan limbah aluminium sebagai material penyimpan energi panas (TES) pada alat pengering skala laboratorium efektif dalam menstabilkan temperatur ruang pengering. Penambahan TES mampu mengurangi penurunan temperatur ruang pengering sebesar 10,59%, dibandingkan dengan 25,56% pada sistem tanpa TES. Dengan demikian, material TES dari limbah aluminium berpotensi mengurangi fluktuasi temperatur selama proses pengeringan, yang pada akhirnya me-ningkatkan efisiensi energi dan kualitas produk kering.

Selain itu, hasil penelitian ini menegaskan bahwa limbah aluminium dapat dimanfaatkan sebagai material TES alternatif yang ramah lingkungan, ekonomis, dan mudah diperoleh. Studi ini berkontribusi pada pengembangan teknologi pengeringan yang lebih berkelanjutan dan hemat energi, serta memperluas aplikasi material limbah industri dalam konteks penyimpanan energi panas.

Ke depan, penelitian lebih lanjut disarankan untuk mengeksplorasi lebih jauh material TES ini dan material lainnya dari limbah industri dan

menguji performanya dalam skala yang lebih besar serta pada berbagai jenis produk kering. Selain itu, perhitungan efisiensi energi secara detail dan analisis ekonomi juga perlu dikembangkan untuk mengoptimalkan desain sistem pengering berbasis TES.

DAFTAR PUSTAKA

- Andharia, J. K., Solanki, J. B., & Maiti, S. (2023). Performance evaluation of a mixed-mode solar thermal dryer with black pebble-based sensible heat storage for drying marine products. *Journal of Energy Storage*, 57. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.106186>
- Apriandi, N., Herlambang, Y. D., Khoryanton, A., Safarudin, Y. M., Baskara, Z. W., & Raharjanti, R. (2023). The Newton Model for Seaweed Drying: An Investigation of a Cabinet Dryer Using Biomass Energy. *Eksergi*, 19(1). <https://jurnal.polines.ac.id/index.php/eksergi>
- Apriandi, N., Kristiawan, T. A., Herlambang, Y. D., Supandi, S., Abidin, Z., & Wibowo, A. D. (2023). Design and performance test of a cabinet type dryer for drying breadfruit chips: a case study of the Sumber Rejeki Purwosari Farmers Group, Semarang City. *Journal of Mechanical Engineering and Applied Technology*, 1(3), 29–35.
- Apriandi, N., Sumarno, F. Gatot, An-Nizhami, A., Luthfiana, N. T. A., Kholifah, N. N., Atohillah, M. K., & Prakoso, R. G. A. (2022). Karakterisasi Alat Pengering Tipe Kabinet Berbahan Bakar Liquefied Petroleum Gas (LPG) Dengan Penambahan Low Cost Material Heat Storage (LCMHS). *Jurnal Rekayasa*



- Mesin, 17(2), 281–288.
<https://jurnal.polines.ac.id/index.php/reakayasa>
- Bhavsar, H., & Patel, C. M. (2023). Performance analysis of cabinet type solar dryer for ginger drying with & without thermal energy storage material. *Materials Today: Proceedings*, 73, 595–603.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.11.280>
- Cetina-Quiñones, A. J., Arici, M., Cisneros-Villalobos, L., & Bassam, A. (2023). Digital twin model and global sensitivity analysis of an indirect type solar dryer with sensible heat storage material: An approach from exergy sustainability indicators under tropical climate conditions. *Journal of Energy Storage*, 58.
<https://doi.org/10.1016/j.est.2022.106368>
- Chaatouf, D., Salhi, M., Raillani, B., Bria, A., Amraqui, S., & Mezrhab, A. (2023). Solar dryer analysis and effectiveness under four seasons with sensible and latent heat storage units. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 85.
<https://doi.org/10.1016/j.ifset.2023.103310>
- Dutta, P., Das, H., Dutta, P. P., & Kalita, P. (2024). Evaluation of an improved indirect solar dryer for Curcuma Amada without and with stone chips as thermal energy storage: An investigation on kinetics, energy, exergy, quality and economic aspects. *Journal of Energy Storage*, 79, 110199.
<https://doi.org/10.1016/j.est.2023.110199>
- Ekka, J. P., & Kumar, D. (2023). A review of industrial food processing using solar dryers with heat storage systems. In *Journal of Stored Products Research* (Vol. 101). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.jspr.2023.102090>
- Gilago, M. C., Mugi, V. R., & V. P., C. (2023). Performance assessment of passive indirect solar dryer comparing without and with heat storage unit by investigating the drying kinetics of carrot. *Energy Nexus*, 9.
<https://doi.org/10.1016/j.nexus.2023.100178>
- Mathew, A. A., Thangavel, V., Mandhare, N. A., & Nukulwar, M. R. (2023). Latent and sensible heat thermal storage in a heat pipe-based evacuated tube solar dryer: A comparative performance analysis. *Journal of Energy Storage*, 57.
<https://doi.org/10.1016/j.est.2022.106305>
- Mugi, V. R., Gilago, M. C., Chandramohan, V. P., & Valasingam, S. B. (2024). Experimental evaluation of performance, drying and thermal parameters of guava slabs dried in a forced convection indirect solar dryer without and with thermal energy storage. *Renewable Energy*, 223.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120005>
- Murali, S., Aniesrani Delfiya, D. S., Alfiya, P. V., Samuel, M. P., & Ninan, G. (2023). Development of sensible heat storage based solar hybrid dryer with evacuated tube collector and biomass gasifier for shrimp drying. *Solar Energy*, 262.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.111836>



Sehrawat, R., Sahdev, R. K., Tiwari, S., & Kumar, S. (2023). Performance analysis and environmental feasibility of bifacial photovoltaic thermal dryer with heat storage. *Energy Conversion and Management*, 288. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117150>

Sudirman, S., Baliarta, I., Sudana, I., Arsana, M. E., An-Nizhami, A., & Apriandi, N. (2023). Aplikasi Cooling

Dehumidification pada Mesin Pengering untuk Mengeringkan Hasil Panen Tanaman Herbal. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 18(1), 37–44. <https://jurnal.polines.ac.id/index.php/rekayasa>

Tanggasari, D., Ariskanopitasari, A., & Afgani, C. A. (2023). Characteristics of drying banana kepok based on the thickness of the slices and the alternating process in making banana sale. *Jurnal Agrotek UMMAT*, 10(1), 66–75.

Tawalbeh, M., Khan, H. A., Al-Othman, A., Almomani, F., & Ajith, S. (2023). A comprehensive review on the recent advances in materials for thermal energy storage applications. *International Journal of Thermofluids*, 18. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100326>

Yüksel, C., Öztürk, M., & Çiftçi, E. (2024). Analysis of a novel V-grooved double pass photovoltaic thermal solar dryer including thermal energy storage. *Applied Thermal Engineering*, 236. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121697>