

PEMBUATAN DAN UJI PERFORMA TERMAL ALAT PENGERING SKALA LABORATORIUM DENGAN PENAMBAHAN *THERMAL ENERGY STORAGE* (TES) BERBASIS *PHASE CHANGE MATERIAL* (PCM)

Nanang Apriandi^{1)*}, Yusuf Dewantoro Herlambang²⁾, Komang Metty Trisna Negara³⁾, Rani Raharjanti⁴⁾

^{1,2)}Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Semarang, Kota Semarang 50275, Indonesia

³⁾Program Studi Teknik Mesin, Universitas Samawa, Unter Iwes-Sumbawa, Indonesia

⁴⁾Komputerisasi Akuntansi, Politeknik Negeri Semarang, Kota Semarang 50275, Indonesia

* nanang.apriandi@polines.ac.id

Abstrak

Pengeringan merupakan salah satu metode pengawetan yang paling banyak digunakan untuk memperpanjang masa simpan produk pertanian, makanan, dan bahan lainnya. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membangun alat pengering skala laboratorium yang inovatif dengan integrasi *thermal energy storage* (TES) berbasis *phase change material* (PCM) menggunakan *paraffin wax* sebagai media penyimpanan energi. Metode yang digunakan meliputi desain alat, perakitan, dan pengujian performa. *Paraffin wax* dipilih karena sifatnya yang mampu menyimpan dan melepaskan energi panas secara efisien pada rentang suhu pengeringan yang dibutuhkan. Penelitian ini secara khusus mengevaluasi kinerja termal dari alat pengering untuk mendapatkan karakteristik sistem berupa distribusi temperatur di ruang pengering, distribusi temperatur pada media TES, dan distribusi temperatur udara keluar alat pengering melalui cerobong. Hasil investigasi menunjukkan bahwa penambahan TES berbasis PCM *paraffin wax* mampu menjaga stabilitas temperatur di ruang pengering. Hal ini nantinya akan berdampak positif pada efisiensi sistem secara keseluruhan.

Kata kunci: alat pengering skala laboratorium; *paraffin wax*, *phase change material*, rancang bangun; *thermal energy storage*

1. Pendahuluan

Dewasa ini, di era yang serba cepat dan efisien, proses pengeringan merupakan elemen krusial dalam berbagai sektor industri, mulai dari pertanian hingga manufaktur [1]. Teknologi pengeringan tidak hanya menuntut kecepatan dan efisiensi, tapi juga keberlanjutan dan kemampuan untuk mengintegrasikan sumber energi terbarukan. Dalam konteks ini, penggunaan *thermal energy storage* (TES) dalam sistem pengeringan menawarkan solusi inovatif yang mampu mengatasi beberapa tantangan tersebut [2].

Pengeringan adalah proses penting yang bertujuan untuk mengurangi kadar air dalam suatu produk, sehingga memperpanjang masa simpan, mengurangi berat dan volume untuk transportasi, dan mempertahankan kualitas produk [3]. Namun, proses ini seringkali membutuhkan jumlah energi yang signifikan [4], terutama energi termal. Dengan meningkatnya kesadaran akan kebutuhan untuk mengurangi konsumsi energi dan emisi karbon, pengembangan sistem pengeringan yang lebih efisien dan ramah lingkungan menjadi prioritas [5].

TES merupakan teknologi yang memungkinkan penyimpanan energi panas yang dapat digunakan pada saat dibutuhkan, meningkatkan fleksibilitas dan efisiensi penggunaan energi dalam proses pengeringan. Dengan mengintegrasikan TES, sistem pengeringan dapat memanfaatkan energi panas yang tersimpan selama periode permintaan rendah atau saat sumber energi tidak tersedia. Hal ini tidak hanya dapat mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil tetapi juga menurunkan biaya operasional dan meningkatkan keberlanjutan proses [6].

Banyak penelitian yang sudah mengeksplorasi pengintegrasian TES ini di dalam sistem pengering [7], baik berupa *sensible* TES [2], [8] maupun menggunakan *latent* TES [9]. Murali et al. melakukan studi pengembangan pengering *hybrid* tenaga surya (*solar*) – biomassa (*gasifier*) untuk pengeringan kerang dengan menggunakan air sebagai material TES [8]. Kinerja pengering diuji melalui tiga mode: *solar*, *gasifier*, dan *hybrid solar-gasifier*, dengan fokus pada

pengeringan sampel kerang (*Metapenaeus Dobsoni*). Studi ini menghasilkan pengurangan kelembaban yang efisien, dimana sistem hibrida mencapai kandungan kelembaban yang diinginkan di kerang dalam waktu 6 jam, melampaui mode *solar* yang membutuhkan 9 jam. Selain itu, efisiensi pengeringan untuk mode *solar*, *gasifier*, dan *hybrid solar-gasifier* adalah 34,97%, 35,62%, dan 41,66%, dengan energi panas yang dapat tersimpan pada sistem TES sebesar 193104 kJ dalam mode *solar* dan 160185 kJ di mode hibrida.

Saat ini, TES dengan material berubah fase (*phase change material/PCM*) telah banyak digunakan di berbagai aplikasi teknik dan industri, salah satunya adalah di sistem pengeringan. PCM muncul sebagai solusi yang sangat efisien untuk penyimpanan energi dengan memanfaatkan kemampuan mereka untuk menyerap, menyimpan, dan melepaskan sejumlah besar energi panas selama transisi fase yang biasanya antara keadaan padat dan cair [10]. Penggunaan PCM dalam sistem pengeringan menyajikan beberapa manfaat, termasuk peningkatan efisiensi energi, mengurangi konsumsi energi, dan kemampuan untuk mempertahankan suhu yang lebih stabil dari waktu ke waktu. Salah satu PCM yang banyak dieksplorasi penggunaannya sebagai material TES adalah *paraffin wax* [11], [12].

Gilago & Chandramohan menginvestigasi pengintegrasian TES berbasis PCM *paraffin wax* ke dalam sistem pengering *indirect solar dryer* (ISD) untuk mengeringkan nanas [13]. Dua skenario pengujian dibandingkan untuk mendapatkan karakteristik pengeringan terbaik, yaitu *passive indirect solar dryer* (PISD) dan *active indirect solar dryer* (AISD). Hasil pengamatan menunjukkan bahwa konfigurasi AISD memiliki kinerja yang lebih baik dari PISD, dengan efisiensi pengeringan masing-masing sebesar 25,77% dan 16,52%. Selain itu, sistem AISD menunjukkan peningkatan konsumsi energi spesifik sebesar 3,5 kWh/kg yang mengkonfirmasi bahwa terjadi efisiensi energi. Secara umum, studi ini menunjukkan pengintegrasian TES berbasis PCM *paraffin wax* ke dalam sistem pengering tenaga surya (baik sistem AISD maupun PISD) secara signifikan dapat meningkatkan efisiensi pengeringan.

Bareen et al. mengeksplorasi kinerja *indirect solar dryer* (ISD) dalam studi komparatif yaitu dengan dan tanpa penggunaan TES berbasis PCM *paraffin wax* [14]. *Lemongrass* yang mengandung minyak *volatile* dan membutuhkan temperatur pengeringan sedang digunakan sebagai bahan yang dikeringkan. Hasil investigasi menunjukkan bahwa pengintegrasian TES berbasis PCM *paraffin wax* ke dalam sistem pengering memungkinkan untuk mempertahankan temperatur udara pengeringan yang hampir konstan selama delapan jam berturut-turut per hari. Tingkat aliran massa optimal untuk mengeringkan udara dengan dan tanpa menggunakan TES berbasis PCM masing-masing sebesar 0,055 kg/s dan 0,08 kg/s. Secara umum, kinerja sistem pengeringan dengan pengintegrasian TES berbasis PCM *paraffin wax* meningkat dan dengan suhu pengeringan yang lebih stabil. Hal ini memungkinkan penggunaan sistem pengeringan tersebut untuk mengeringkan produk pertanian yang memiliki sensitifitas terhadap fluktuasi suhu pengeringan seperti halnya rempah-rempah.

Penerapan TES dalam sistem pengeringan menghadapi tantangan, termasuk desain sistem yang optimal, pemilihan material penyimpanan energi termal yang efektif, dan integrasi dengan sumber energi terbarukan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membangun alat pengering dengan penambahan *thermal energy storage* (TES) berbasis PCM, mengevaluasi kinerjanya, dan mengidentifikasi solusi terbaik untuk mengatasi tantangan-tantangan tersebut. Dengan mempertimbangkan kebutuhan akan teknologi pengeringan yang lebih efisien dan berkelanjutan, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan dalam pengembangan sistem pengeringan yang inovatif. Melalui pemanfaatan PCM *paraffin wax* sebagai material TES, diharapkan dapat menciptakan solusi yang tidak hanya meningkatkan efisiensi energi tetapi juga mendukung transisi ke energi bersih dan keberlanjutan lingkungan.

2. Material dan Metode

Metode penelitian yang digunakan adalah penyederhanaan metode perancangan dan pengembangan Pahl dan Beitz serta metode manufaktur DFMA (*design for manufacturing and assembly*) [15]. Selain itu, penelitian ini berbasis *experimental based applied research* sehingga segala kegiatan penelitian dilakukan di laboratorium [16], bertempat di Laboratorium Konversi Energi, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Semarang (-7.053253, 110.435327). Tahapan penelitian ini mengikuti tahapan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Tahapan penelitian

2.1. Desain

Desain alat pengering skala laboratorium yang akan dibangun menggunakan *software SolidWork 2023* yang tertuang dalam bentuk gambar teknis. Adapun daftar keharusan yang dipersyaratkan pada alat pengering yang akan dirancang dan dibangun secara detail seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Daftar Persyaratan Hasil Identifikasi Kebutuhan

PERSYARATAN	HASIL IDENTIFIKASI
Geometri	Dimensi alat pengering tidak terlalu besar, memiliki bentuk sederhana, dan ringan.
Energi	Sumber energi banyak tersedia
Material	Material banyak tersedia di pasaran, dan tahan karat.
Perakitan	Mudah dibongkar pasang
Keselamatan	Aman digunakan dalam waktu yang lama
Alat Ukur	Dilengkapi alat ukur standar penelitian berupa data akuisisi
Ergonomis	Ukuran disesuaikan dengan rata-rata ukuran tubuh pengguna

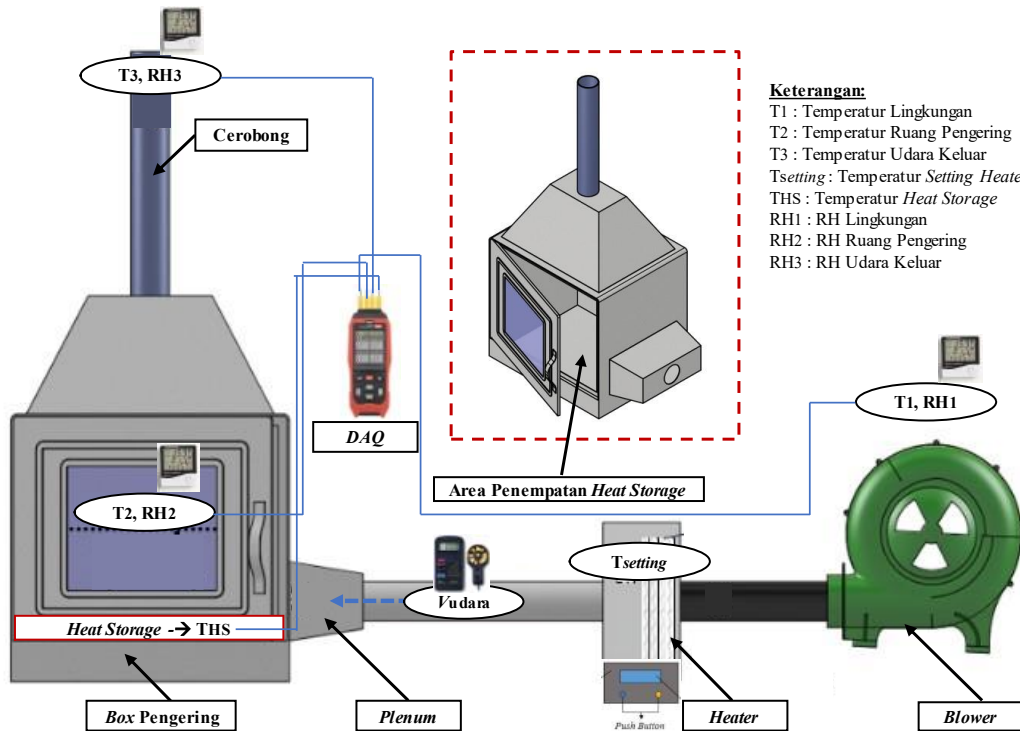
2.2. Pembuatan

Alat pengering dirancang dan dibangun di *Workshop* Teknik Mesin, Politeknik Negeri Semarang.

2.3. Pengujian

Karakteristik termal alat pengering berupa distribusi temperatur di ruang pengering, temperatur PCM, dan temperatur udara keluar alat pengering diinvestigasi secara eksperimental. Sebanyak 250 gram *paraffin wax* digunakan sebagai material TES yang diintegrasikan ke dalam alat pengering dan ditempatkan di bagian bawah rak di dalam ruang pengering. *Thermocouple* tipe K (*range*: -200 ~ +1372°C) yang dihubungkan dengan sistem data akuisisi (DAQ) TASI TA612C

(akurasi: $\pm 0,2 \sim 0,7\%$) digunakan untuk mengukur temperatur sistem berupa: temperatur ruang pengering, temperatur PCM, temperatur udara keluar ruang pengering, dan temperatur lingkungan. *Anemometer* Lutron AM-4200 digunakan mengukur kecepatan udara yang masuk ke dalam ruang pengering. Pengambilan data dilakukan selama 180 menit dengan komposisi 120 menit untuk proses pemanasan dan 60 menit untuk proses pendinginan (*heater* dalam kondisi dimatikan). Detail skematik sistem dan ilustrasi penempatan alat ukur di dalam pengujian seperti terlihat pada Gambar 2.

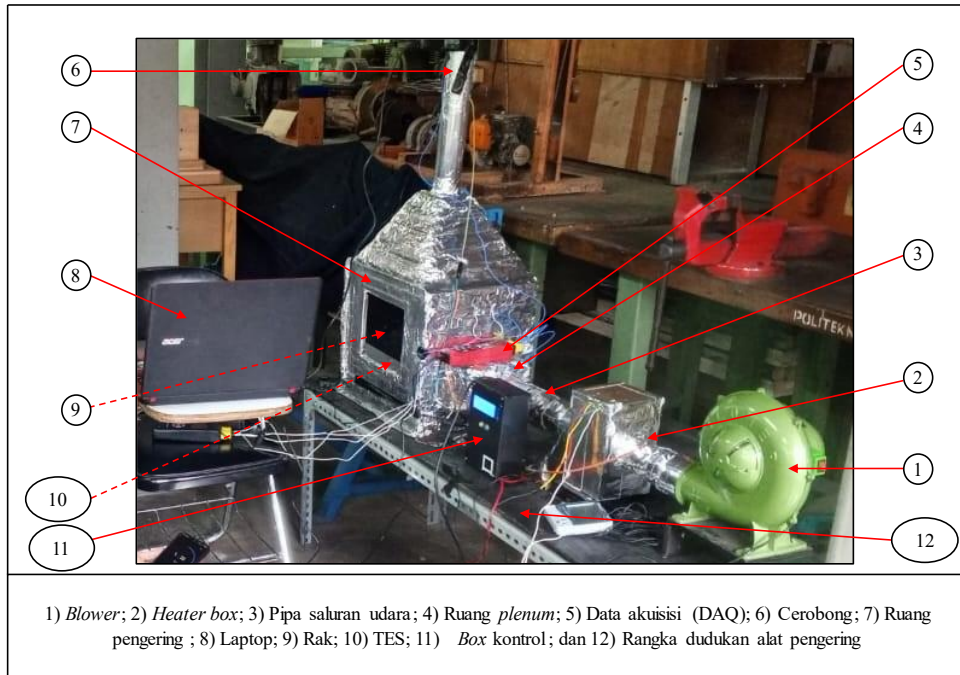


Gambar 2. Skematik sistem pengujian

3. Hasil dan Pembahasan

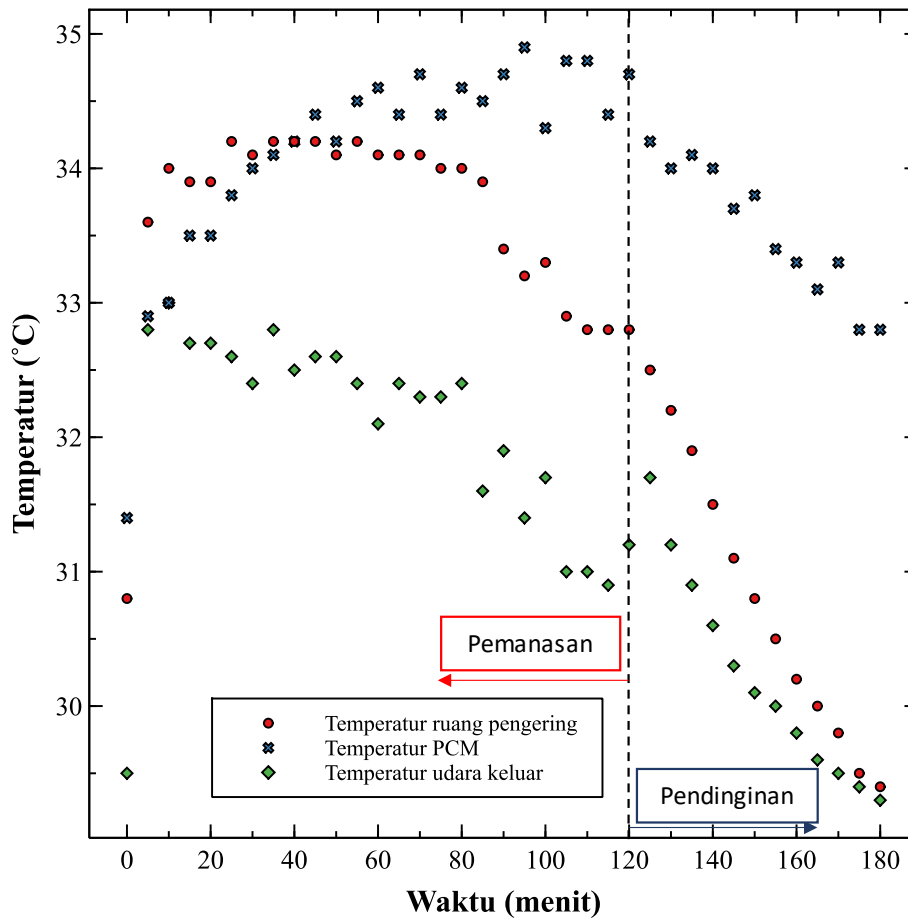
3.1. Gambaran Teknologi

Gambar 3 menunjukkan *photograph* alat pengering skala laboratorium yang dibangun mengacu pada desain dan persyaratan minimal yang terdapat pada Tabel 1. Alat pengering tipe kabinet dipilih guna mempermudah proses pembuatan. Dinding ruang pengering dibuat dari bahan aluminium dan bagian luar dilengkapi dengan isolator untuk meminimalisir panas terbuang ke lingkungan. Dikarenakan alat pengering didesain untuk skala pengujian (skala laboratorium), oleh karenanya, alat pengering ini dilengkapi dengan beberapa komponen, diantaranya: 1) *blower* sebagai kontrol kecepatan udara pengeringan; 2) *heater* yang dapat diatur suplai panasnya melalui pengaturan tegangan input; 3) pipa saluran udara yang dilengkapi dengan isolator; 4) ruang *plenum* sebagai tempat homogenisasi temperatur udara pengering yang akan masuk ke ruang pengering; 5) modul data akuisisi sebagai alat perekam data hasil pengujian; 6) cerobong keluaran udara pengering yang dilengkapi dengan isolator; 7) ruang pengering; 8) laptop; 9) satu buah rak pengering yang dilengkapi dengan sensor berat untuk mengetahui laju massa pengeringan; 10) TES berbasis PCM *paraffin wax* sebagai penyimpan panas saat proses *charging*/pemanasan; 11) *box* kontrol untuk mengatur tegangan yang diberikan ke *heater* untuk mendapatkan variasi temperatur *setting*, dan 12) rangka dudukan alat pengering.



Gambar 3. Photograph alat pengering skala laboratorium

3.2. Pengujian Karakteristik Termal alat Pengering Tanpa Pembebanan



Gambar 4. Karakteristik termal alat pengering

Kinerja alat pengering dapat diprediksi melalui nilai karakteristik termal yang terdapat pada alat pengering, khususnya berupa distribusi temperatur pada ruang pengering [2]. Gambar 4 menunjukkan karakteristik termal alat pengering yang dibangun dengan mengintegrasikan TES berbasis PCM *paraffin wax* ke dalam alat pengering berupa distribusi temperatur pada ruang pengering, PCM, dan udara keluar ruang pengering. Terlihat bahwa, distribusi temperatur pada ruang pengering saat 80 menit awal pengoperasian cenderung stabil. Di sisi lain, temperatur *paraffin wax* cenderung mengalami kenaikan pada saat proses pemanasan. Hal ini berarti bahwa, temperatur udara panas yang masuk ke dalam ruang pengering disamping digunakan untuk proses pengeringan, juga digunakan untuk memanaskan material TES (dalam hal ini *paraffin wax*). Panas yang terserap oleh material tersebut akan disimpan dan kemudian dilepaskan kembali pada saat proses *discharging*/pendinginan. Hasil ini bersesuaian dengan hasil pengamatan yang dilakukan oleh [10], [13], [14], [17].

Distribusi temperatur udara keluar dari ruang pengering melalui cerobong memiliki tren yang sama dengan distribusi temperatur pada ruang pengering. Kecenderungan ini disinyalir dipengaruhi oleh kecepatan udara yang dialirkan ke dalam ruang pengering dikontrol konstan selama proses. Hasil ini bersesuaian dengan penelitian yang dilaporkan oleh [2]. Temperatur tertinggi yang dapat dicapai di ruang pengering yaitu sebesar 34,2 °C. Sementara temperatur tertinggi TES sebesar 34,9 °C. Adapun rata-rata temperatur lingkungan selama pengujian yaitu sebesar 29,6 °C.

4. Kesimpulan

Karakteristik termal alat pengering terintegrasi TES berbasis PCM *paraffin wax* yang diwakili oleh distribusi temperatur baik di ruang pengering, PCM, maupun udara keluar alat pengering diinvestigasi di dalam studi ini. Pada proses pemanasan, tren temperatur untuk ketiga kondisi tersebut cenderung mengalami kenaikan dengan temperatur rata-rata masing-masing sebesar 32,7 °C, 33,9 °C, dan 31,4 °C. Penggunaan *paraffin wax* sebagai material TES yang diintegrasikan ke dalam ruang pengering cenderung memiliki kemampuan yang baik untuk mempertahankan temperatur ruang pengering pada rentang temperatur pengeringan, khususnya pada saat proses pendinginan dengan rata-rata temperatur sebesar 31 °C.

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Laboratorium *Applied Thermofluid* Rowosari atas fasilitas berupa alat ukur dan modul data akuisisi yang digunakan di dalam penelitian ini.

Daftar Pustaka

- [1] N. Apriandi *et al.*, “Desiminasi Teknologi Tepat Guna Pada Kelompok Tani Sumber Rejeki Purwosari Guna Menambah Nilai Manfaat Buah Sukun,” *JURNAL PENGABDIAN MASYARAKAT BANGSA*, vol. 1, no. 10, pp. 2659–2666, 2023.
- [2] N. Apriandi *et al.*, “Karakterisasi alat pengering tipe kabinet berbahan bakar liquefied petroleum gas (LPG) dengan penambahan low cost material heat storage (LCMHS),” *Jurnal Rekayasa Mesin*, vol. 17, no. 2, pp. 281–288, 2022, [Online]. Available: <https://jurnal.polines.ac.id/index.php/rekayasa>

- [3] N. Apriandi, Y. D. Herlambang, A. Khoryanton, Y. M. Safarudin, Z. W. Baskara, and R. Raharjanti, "The Newton model for seaweed drying: an investigation of a cabinet dryer using biomass energy," *Eksergi*, vol. 19, no. 1, pp. 1–4, 2023, [Online]. Available: <https://jurnal.polines.ac.id/index.php/eksergi>
- [4] S. Sudirman, I. N. G. Baliarta, I. M. Sudana, M. E. Arsana, A. An-Nizhami, and N. Apriandi, "Aplikasi cooling dehumidification pada mesin pengering untuk mengeringkan hasil panen tanaman herbal," *Jurnal Rekayasa Mesin*, vol. 18, no. 1, pp. 37–44, 2023, [Online]. Available: <https://jurnal.polines.ac.id/index.php/rekayasa>
- [5] N. Apriandi, T. Anggit Kristiawan, Y. Dewantoro Herlambang, Z. Abidin, and A. Dwiandara Wibowo, "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*, vol. 1, no. 3, pp. 29–35, 2023.
- [6] E. G. Barbosa, M. E. V. de Araujo, A. C. L. de Oliveira, and M. A. Martins, "Thermal energy storage systems applied to solar dryers: Classification, performance, and numerical modeling: An updated review," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 45, May 2023, doi: 10.1016/j.csite.2023.102986.
- [7] J. P. Ekka and D. Kumar, "A review of industrial food processing using solar dryers with heat storage systems," *Journal of Stored Products Research*, vol. 101. Elsevier Ltd, Mar. 01, 2023. doi: 10.1016/j.jspr.2023.102090.
- [8] S. Murali, D. S. Aniesrani Delfiya, P. V. Alfiya, M. P. Samuel, and G. Ninan, "Development of sensible heat storage based solar hybrid dryer with evacuated tube collector and biomass gasifier for shrimp drying," *Solar Energy*, vol. 262, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.solener.2023.111836.
- [9] P. Sain, V. Songara, R. Karir, and N. Balan, "Natural Convection Type Solar Dryer with Latent heat storage," in *2013 International Conference on Renewable Energy and Sustainable Energy (ICRESE'13)*, 2013, pp. 9–14.
- [10] A. Lingayat, P. Das, M. C. Gilago, and V. P. Chandramohan, "A detailed assessment of paraffin waxed thermal energy storage medium for solar dryers," *Solar Energy*, vol. 261. Elsevier Ltd, pp. 14–27, Sep. 01, 2023. doi: 10.1016/j.solener.2023.05.047.
- [11] A. A. Mathew and T. Venugopal, "Solar power drying system: a comprehensive assessment on types, trends, performance and economic evaluation," *International Journal of Ambient Energy*, vol. 42, no. 1. Taylor and Francis Ltd., pp. 96–119, 2021. doi: 10.1080/01430750.2018.1507933.
- [12] D. Jain and P. Tewari, "Performance of indirect through pass natural convective solar crop dryer with phase change thermal energy storage," *Renew Energy*, vol. 80, pp. 244–250, Aug. 2015, doi: 10.1016/j.renene.2015.02.012.
- [13] M. C. Gilago and V. P. Chandramohan, "Study of drying parameters of pineapple and performance of indirect solar dryer supported with thermal energy storage: Comparing passive and active modes," *J Energy Storage*, vol. 61, May 2023, doi: 10.1016/j.est.2023.106810.
- [14] A. Bareen, S. Dash, P. Kalita, and K. K. Dash, "Experimental investigation of an indirect solar dryer with PCM-integrated solar collector as a thermal energy storage medium," *Environmental Science and Pollution Research*, Mar. 2023, doi: 10.1007/s11356-023-26690-2.
- [15] D. Rahmalina, A. Suwandi, D. Handika Edi, and dan Reinnaldy Martonggo, "Rancang Bangun Alat Pengering Cabai Skala Laboratorium dengan Pemanfaatan Concentrated Solar Power," *Jurnal Asimetrik: Jurnal Ilmiah Rekayasa dan Inovasi*, vol. 4, no. 1, pp. 105–116, 2022.
- [16] A. Priyati, S. H. Abdullah, S. A. Muttalib, A. F. Hidayat, N. Apriandi, and Z. Widya Baskara, "METODE PENGEPRESAN UNTUK MENINGKATKAN KUALITAS INDUSTRI PEMBUATAN TAHU DI KELURAHAN KEKALIK JAYA KOTA MATARAM," *Jurnal Abdi Mas TPB*, vol. 2, no. 1, pp. 43–51, 2020, [Online]. Available: www.abdimastpb.unram.ac.id

- [17] E. L. Rulazi, J. Marwa, B. Kichonge, and T. Kivevele, "Development and Performance Evaluation of a Novel Solar Dryer Integrated with Thermal Energy Storage System for Drying of Agricultural Products," *ACS Omega*, vol. 8, no. 45, pp. 43304–43317, Nov. 2023, doi: 10.1021/acsomega.3c07314.