

Performa Tungku Hibrid Energi Surya dan Gas untuk Alat Pengering Kabinet dengan Sistem Cerdas

Performance of Solar and Gas Hybrid Furnace for Cabinet Dryer with Intelligent System

Abdul Waris¹, Mursalim¹, Anugerah Fitri Amalia^{2*}

¹ Agricultural Engineering Program, Hasanuddin University, Makassar, Indonesia.

² Research Center for Sustainable Production System and Life Cycle Assessment, BRIN, Serpong, Indonesia.

Email*): anug006@brin.go.id

Received:
29 December 2023

Revised:
1 March 2024

Accepted:
11 March 2024

Published:
27 March 2024

DOI:
10.29303/jrpb.v12i1.616

ISSN 2301-8119, e-ISSN
2443-1354

Available at
<http://jrpb.unram.ac.id/>

Abstract: This study aims to evaluate the performance of a cabinet dryer that uses hybrid solar energy and LPG. Renewable energy is essential for agricultural drying. This hybrid system dryer uses fuzzy logic and expert system technology to optimize the amount of energy used. The test methods include tests of solar collectors, air and gas valves, and drying and energy consumption using 10 kg of fresh sago. The results show that hybrid and non-hybrid (gas only) fulfill sago's temperature and moisture content requirements for drying. With the integration of fuzzy logic and expert system technology, the machine can optimize solar and gas energy efficiency, resulting in 53% out of 100% savings compared to non-hybrid. In addition to energy savings, the operating cost of the hybrid system is cheaper than non-hybrid. In conclusion, applying a solar-LPG hybrid system in a cabinet-type dryer can optimize performance and reduce energy consumption and operating costs.

Keywords: drying machine; fuzzy-expert; hybrid furnace; solar-gas

Abstrak: Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi kinerja alat pengering kabinet yang menggunakan hibrid energi surya dan LPG. Energi terbarukan sangat penting untuk pengeringan pertanian. Mesin pengering sistem hibrid ini menggunakan teknologi fuzzy logic dan expert system untuk mengoptimalkan jumlah energi yang digunakan. Metode pengujian meliputi: uji kolektor surya, katup udara dan gas, serta pengeringan dan konsumsi energi dengan menggunakan 10 kg sago segar. Hasilnya menunjukkan bahwa hibrid dan non-hibrid (gas saja) memenuhi persyaratan suhu dan kadar air sago untuk pengeringan. Dengan integrasi teknologi fuzzy logic dan expert system, mesin ini dapat mengoptimalkan penggunaan energi surya dan gas secara efisien, dapat terlihat hasilnya 53% dari 100% lebih hemat dibanding non-hibrid. Selain penghematan energi, biaya pengoperasian sistem hibrid lebih murah dari non-hibrid. Kesimpulan, penerapan sistem hibrid surya-LPG pada alat pengering tipe kabinet dapat mengoptimalkan kinerja dan mengurangi konsumsi energi serta biaya operasional.

Kata kunci: *fuzzy-expert*; mesin pengering; surya-gas; tungku hibrid

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Menghadapi tantangan dalam pengelolaan sumber daya energi, pengambilan keputusan mengenai pemanfaatan optimal energi terbarukan menjadi kunci untuk menjamin ketersediaan energi yang berkelanjutan di suatu wilayah (Wang et al., 2009). Beragam upaya telah dilakukan guna meningkatkan keberlanjutan dan pemanfaatan energi, contohnya pengembangan model Sistem Energi Terbarukan Terintegrasi (IRES) (Woldeyohannes et al., 2016). Model IRES merupakan metode efisien untuk mengelola sumber daya energi terbarukan, dengan fokus pada optimalisasi pemanfaatan energi dari sinar matahari, angin, dan biomassa (Fuso Nerini et al., 2014).

Selain IRES, pendekatan alternatif lain untuk mengoptimalkan pemanfaatan energi yakni menerapkan prinsip sistem energi hibrid. Dalam sistem hibrid, sumber energi terbarukan dipadukan dengan sumber konvensional guna memenuhi permintaan (Gupta et al., 2008). Sistem ini melibatkan enam proses utama: pengelompokan wilayah, penentuan kebutuhan energi, penilaian ketersediaan pasokan, perkiraan biaya per unit, penetapan kapasitas dan optimasi, serta perumusan model.

Pengembangan sumber energi dianggap sebagai solusi menjawab tantangan di bidang energi dan lingkungan di sejumlah negara, misalnya pada mesin pengering pertanian. Pengeringan hasil pertanian merupakan salah satu tahap penting proses pascapanen. Tujuan utamanya antara lain memudahkan penanganan, transportasi dan distribusi, mengurangi kebutuhan ruang penyimpanan, mempertahankan daya kecambah benih, memperpanjang masa simpan, memungkinkan perencanaan waktu panen yang tepat, dan meningkatkan keuntungan petani. Pengeringan dengan sinar matahari digunakan untuk memanfaatkan intensitas maksimum radiasi matahari dan kelembaban udara pengeringan yang relatif mudah diperoleh (Bala & Mondol, 2001). Namun, kelemahan utamanya adalah energi matahari di luar ruangan tidak dapat dikontrol, sehingga proses pengeringan tidak optimal (Okoroigwe et al., 2013). Pengeringan hasil pertanian membutuhkan konsumsi energi yang intensif.

Mesin pengering digunakan untuk menurunkan kadar air suatu produk dari 70-96% menjadi 8-14% (Tika, 2022). Terdapat beragam teknologi pengeringan seperti *flatbed dryer*, *recirculating batch dryer*, *continuous flow dryer*, dan *in-store drying* (Saputra et al., 2021). Tungku menjadi elemen penting dalam mesin pengering karena berfungsi memasok energi panas. Mesin pengering hasil pertanian membutuhkan energi yang signifikan (Udomkun et al., 2020). Ketergantungan pada bahan bakar fosil berdampak pada biaya dan lingkungan (Nwakuba et al., 2016).

Dalam menghadapi tantangan tersebut, banyak masyarakat telah beralih ke penggunaan alat pengering yang menggunakan energi surya. Namun, pemanfaatan energi surya belum optimal karena terbatas oleh faktor cuaca, ketersediaan energi surya yang tidak kontinu, dan hanya efektif selama sekitar 5 jam per hari. Untuk mengatasi hal ini, pemanfaatan energi surya dapat dioptimalkan dengan menerapkan teknologi hibrid. Salah satu teknik yang menjanjikan adalah gabungan antara *sistem thermal energy storage* (TES) dengan pengering surya, yang memungkinkan penyimpanan energi panas sinar matahari selama periode terang dan kemudian dapat digunakan saat sinar matahari tidak tersedia (Bal et al., 2011; Lakshmi et al., 2018).

Penggunaan sistem TES, khususnya *sensible heat storage* (SHS), menjadi pilihan yang menarik (Nallusamy et al., 2007). Teknologi ini memungkinkan energi panas disimpan sebagai panas sensibel, laten, dan termo-kimia dengan mengubah energi internal bahan cair atau padat. SHS relatif murah dan cocok untuk pengeringan surya karena dapat bekerja pada suhu rendah (25-90°C) (Alva et al., 2018). Berbagai bahan SHS seperti minyak termal, lapisan

batu, beton, batu bata, kerikil, pasir, dan kerikil telah diintegrasikan dengan pengering surya untuk mengeringkan berbagai produk pertanian (Alva et al., 2017).

Dari berbagai bahan SHS yang tersedia, zat cair tampaknya menjadi pilihan yang paling menjanjikan karena memiliki kapasitas panas spesifik yang tinggi, tidak beracun, biaya rendah, dan mudah tersedia (Kant et al., 2016). Penggunaan zat cair sebagai fluida perpindahan panas dan bahan penyimpan energi panas dalam sistem aktif memiliki keuntungan yang signifikan dalam meningkatkan efisiensi pengeringan (Murali et al., 2020).

Meskipun demikian, alat pengering tungku gas LPG hibrid dengan energi surya telah dikembangkan untuk alat pengering dengan menggunakan sistem cerdas (*fuzzy logic* dan *expert system*). Fuzzy logic dan expert system adalah dua konsep yang berkaitan dalam dunia pemrograman dan sistem intelijen. *Expert system* adalah sistem komputer yang menggabungkan ilmu dan keterampilan manusia untuk memecahkan masalah dan *fuzzy logic* adalah sistem pemrograman yang menggambarkan kemungkinan, kekurangan, dan kekerasan (El-shal et al., 2000). Namun belum ada penilaian yang dilakukan terhadap kinerjanya jika diterapkan pada alat pengering tipe kabinet. Oleh karena itu, perlu dilakukan serangkaian pengujian untuk mengevaluasi kinerja tungku tersebut pada alat pengering tipe kabinet, dengan menggunakan sagu segar sebagai objek pengeringan. Ini akan membantu dalam menentukan keefektifan dan potensi penggunaan tungku gas LPG hibrid dalam konteks pengeringan tipe kabinet yang lebih luas.

Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui kinerja alat pengering tipe kabinet dengan menggunakan sistem hibrid energi surya dan LPG. Hasil penelitian ini diharapkan menjadi informasi dalam pengembangan mesin pengering yang memanfaatkan energi terbarukan.

METODE PENELITIAN

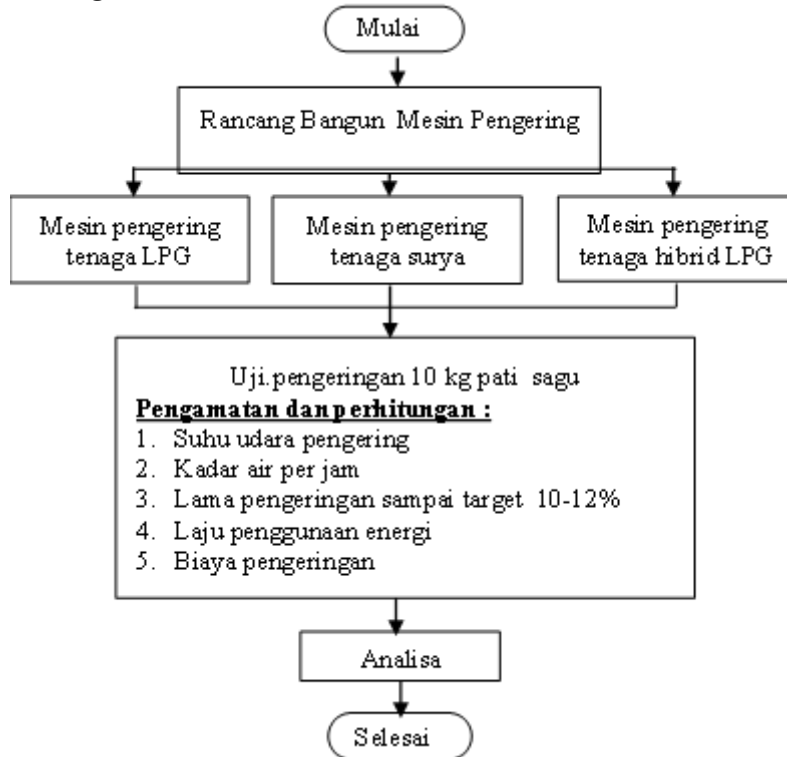
Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini yaitu: mesin las listrik dan argon, alat pelipat dan pemotong plat, alat perbengkelan, ayakan, baskom, thermometer, anemometer, jangka sorong dan timbangan digital, buret, gelas ukur, lap basah pengaduk/sendok, oven, cawan, tanur listrik, desikator, Erlenmeyer, colorimeter, neraca analitik, spektrofotometri, laptop, kWh meter, software Arduino IDE dan Matlab.

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu sagu, plat stainless steel 304, plat aluminium, paket sistem kontrol, blower, burner gas berdaya 400-6500 watt, tabung gas berkapasitas 3 kg, kolektor surya berukuran 184x93x12cm, dan lain-lain.

Metode

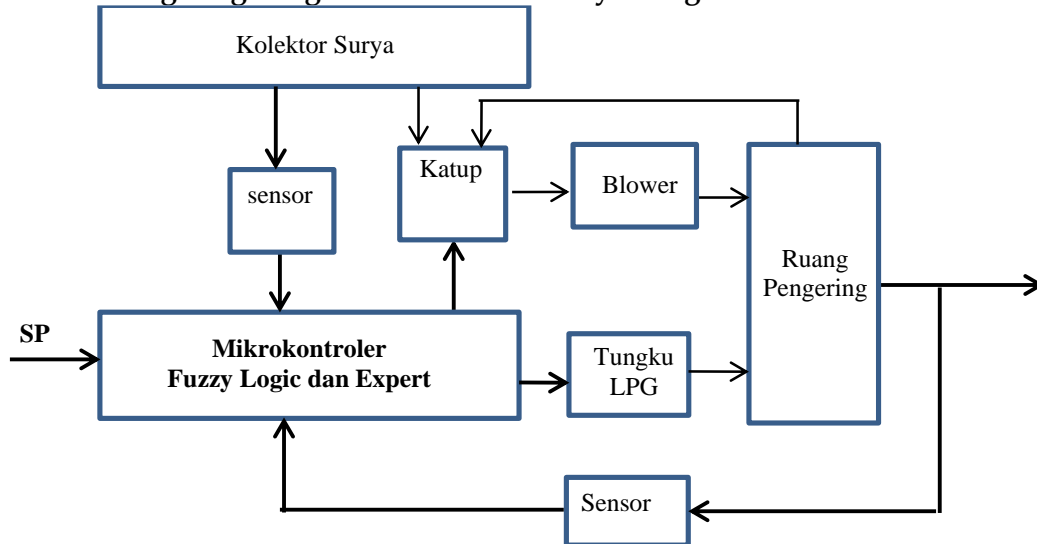
Diagram Alir Rancangan Penelitian



Gambar 1. Diagram alir metodologi penelitian

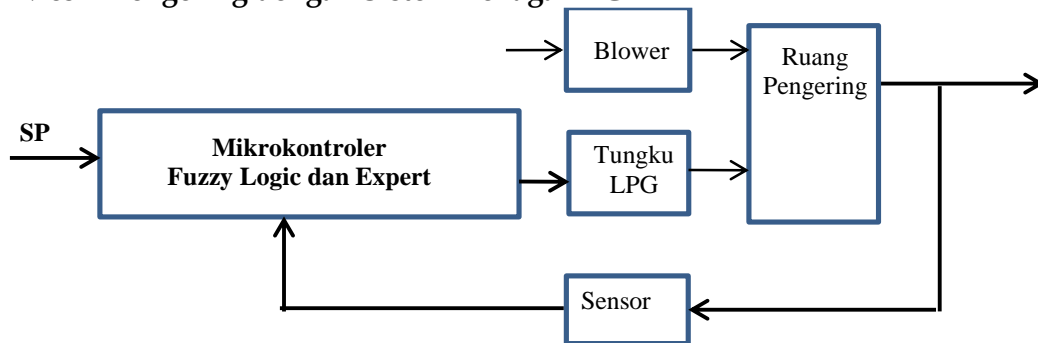
Skenario Rancangan Penelitian

a. Mesin Pengering dengan sistem Hibrid surya dengan LPG



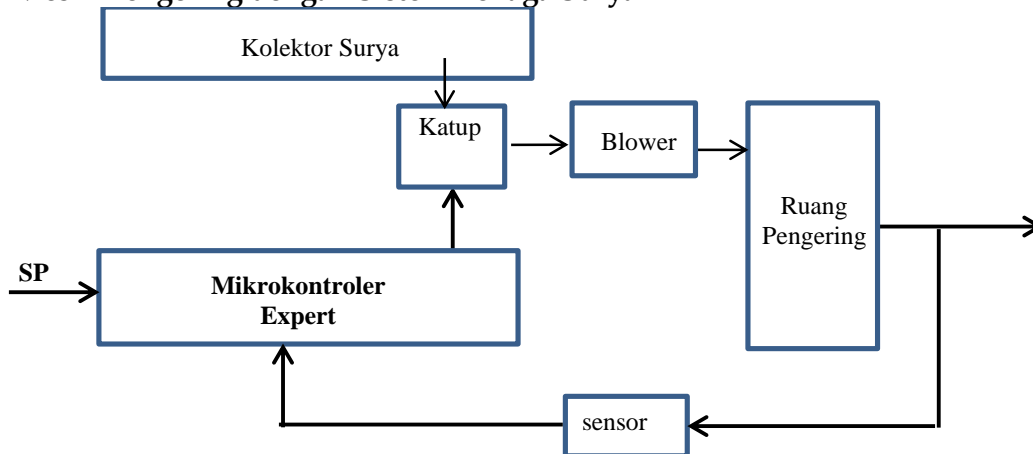
Gambar 2. Mesin pengering dengan sistem hibrid LPG dengan surya

b. Mesin Pengering dengan Sistem Tenaga LPG



Gambar 3. Mesin pengering dengan sistem tenaga LPG

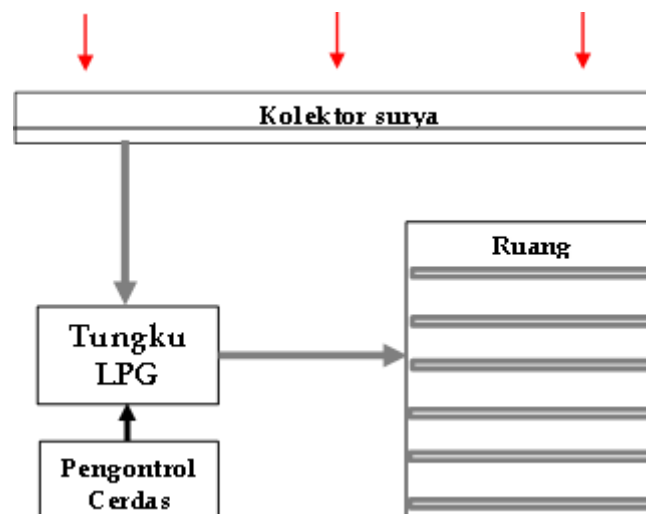
c. Mesin Pengering dengan Sistem Tenaga Surya



Gambar 4. Mesin Pengering dengan sistem tenaga surya

Konsep Tungku Hibrid

Model sistem hibrid seperti Gambar 1. Pada uji digunakan alat pengering tipe rak yang terdiri dari 20 talam atau kapasitas 20 kg sagu basah.



Gambar 5. Model sistem hibrid energi surya dengan LPG untuk pengeringan

Prinsip kerja sistem hibrid yaitu saat tungku LPG dihidupkan sistem fuzzy logic memprediksi daya pemanas yang diperlukan oleh ruang pengering (P1) dan expert system memprediksi daya termal yang dihasilkan kolektor surya (P2). Selisih antara daya hasil prediksi tersebut adalah sinyal kontrol bagi kontrol expert untuk mengendalikan katup gas burner. Dengan cara demikian tungku dapat membakar gas secara bervariasi dari 400–6.500J/s tergantung pada hasil prediksi. Selain itu, kontrol expert juga mengendalikan besar bukaan katup udara yaitu bila suhu di kolektor rendah, maka bukaan katup udara dari kolektor diperkecil secara otomatis dan bukaan katup udara dari burner diperbesar secara otomatis dengan demikian kebutuhan oksigen pembakaran saat burner membakar LPG pada laju yang tinggi terpenuhi.

Metode Uji

Pengujian tungku dikelompokkan menjadi:

1. Uji kolektor surya,
2. Uji katup udara dan gas,
3. Uji pengeringan dan konsumsi energi.
4. Biaya pengeringan.

Pada uji pengeringan, mesin dijalankan pada tiga cara, yaitu (1) mesin dijalankan dengan menggunakan energi hibrid surya dan gas, (2) mesin dijalankan dengan menggunakan energi gas saja, dan (3) mesin dijalankan dengan menggunakan energi surya saja. Semua skenario menggunakan sagu basah masing-masing seberat 10kg, suhu udara pengering (*setting point*), kecil dari suhu gelatinisasi pati sagu (Ehara & Toyoda, 2018), yaitu $Sp=60^{\circ}C$, dan dihentikan setelah mencapai kadar air 10-12% (Widaningrum et al., 2005).

Sinyal pengendali katup gas burner

$$u = P2 - P1 \dots\dots\dots (1)$$

Dimana:

u = sinyal kontrol bagi kontrol expert untuk mengendalikan katup gas burner (J/s)

$P1$ = daya pemanas yang diperlukan oleh ruang pengering (J/s)

$P2$ = daya termal yang dihasilkan kolektor (J/s)

Kadar Air Hasil Pengeringan

Perubahan kadar air terhadap waktu dihitung berdasarkan kadar air basis basah (%bb) menggunakan persamaan (2) sebagai berikut (Rawung et al., 2021):

$$m = \frac{Wm}{Wm+Wd} \times 100\% \dots\dots\dots (2)$$

Dimana:

m = kadar air basis basah (%)

Wm = berat air dalam bahan (gr)

Wd = berat bahan kering mutlak (gr)

Efisiensi Termal

Efisiensi termal adalah ukuran efisiensi termal tungku, yang didefinisikan sebagai perbandingan energi yang diberikan oleh tungku (energi input) dengan panas yang diserap atau dimanfaatkan (energi output) (Osintsev et al., 2023):

$$\eta'_m = \frac{Q_3}{Q_1+Q_2+Q_4} \times 100\% \dots\dots\dots (3)$$

$$\eta_m = \frac{Q_5}{Q_3} \times 100\% \dots\dots\dots (4)$$

Dimana:

- η_m = efisiensi tungku (%)
- η_m = efisiensi termal (%)
- Q_1 = energi masuk yang berasal dari kolektor (J/s)
- Q_2 = energi yang digunakan ulang (J/s)
- Q_3 = energi yang keluar dari tungku (J/s)
- Q_4 = energi yang masuk (J/s)
- Q_5 = energi yang dibutuhkan untuk pengeringan (J/s)

Laju Energi Masuk yang Berasal dari Kolektor (kJ/s)

$$Q_1 = V_1 * A_1 * \rho_1 * Cp_1 * (T_1 - T_a) \dots\dots\dots (5)$$

Dimana,

- V_1 = kecepatan udara dari kolektor (m/s)
- A_1 = luas penampang saluran udara (m²)
- ρ_1 = berat spesifik udara dari kolektor (kg/m³)
- Cp_1 = Panas spesifik udara dari kolektor (kJ/kg°C)
- T_1 = suhu udara kolektor rata-rata (°C)
- T_a = suhu udara lingkungan rata-rata (°C)

Laju Energi yang digunakan Ulang (kJ/s)

$$Q_2 = V_2 * A_2 * \rho_2 * Cp_2 * (T_2 - T_a) \dots\dots\dots (6)$$

Dimana,

- V_2 = kecepatan udara dari sistem pembuangan (m/s)
- A_2 = luas penampang saluran udara (m²)
- ρ_2 = berat spesifik udara dari kolektor (kg/m³)
- Cp_2 = Panas spesifik udara dari kolektor (kJ/kg°C)
- T_2 = suhu udara kolektor rata-rata (°C)
- T_a = suhu udara lingkungan rata-rata (°C)

Energi Pembakaran LPG (Hadji et al., 2022)

$$Q_3 = W_g \times Nkb/t \dots\dots\dots (7)$$

Dimana:

- Q_3 = laju energi hasil pembakaran (kJ/s)
- W_g = berat LPG yang digunakan (kg/s)
- Nkb = nilai kalor bawah LPG (kJ/kg)
- t = lama tungku LPG beroperasi (s)

Energi untuk Menguapkan Air Bahan (Asiah & Djaeni, 2021)

$$Q_3 = W_a \times \frac{H_{fg}}{t} \dots\dots\dots (8)$$

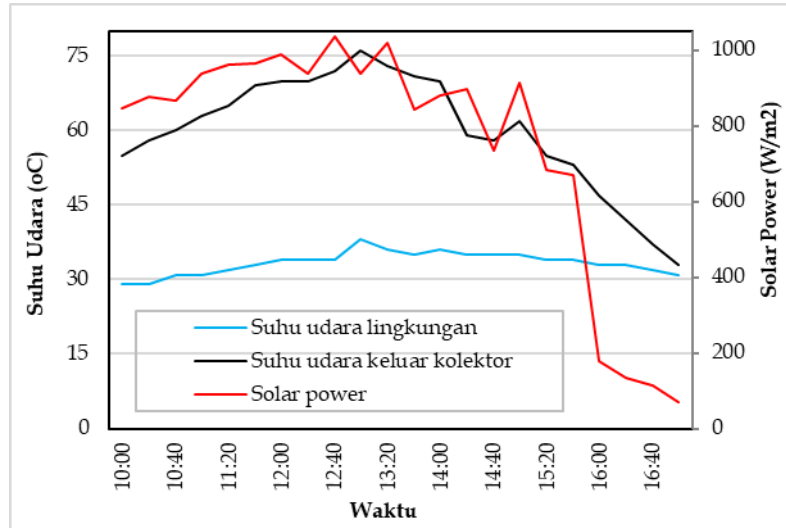
Dimana:

- Q_1 = laju energi untuk pengeringan (kJ/s)
- W_a = berat air yang diuapkan (kgH₂O)
- H_{fg} = panas laten penguapan air pada suhu jenuh (kJ/kgH₂O)
- t = lama pengeringan (s)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kolektor Surya

Saat *blower* tungku dihidupkan dan suhu udara keluar kolektor diamati, hasil dapat dilihat pada Gambar 6 berikut:



Gambar 6. Iradiasi surya dan suhu udara yang dihasilkan kolektor

Dapat dilihat pada Gambar 6 bahwa iradiasi surya yang diterima kolektor mampu menaikkan suhu udara kolektor, yaitu antara jam 10.00 sampai jam 13.00, suhu kolektor naik 55-76°C; kemudian suhu antara jam 13.00 sampai 17.00 suhu kolektor turun perlahan dari 76-37°C. Hal ini menunjukkan bahwa kolektor surya mampu mengkonversi energi surya ke energi termal untuk tujuan pengeringan. Namun demikian, suhu udara yang dihasilkan kolektor cukup bervariasi atau tidak stabil, suhu udara sangat tergantung pada intensitas radiasi surya. Dengan mempertahankan lapisan udara panas di atas plat kolektor dan mengurangi kehilangan panas radiasi kembali, radiasi surya dapat mengurangi konduksi dan konveksi panas yang hilang. Ketika panas yang hilang dari plat kolektor surya berkurang, kolektor menjadi lebih efisien (Erlina & Tazi, 2009).

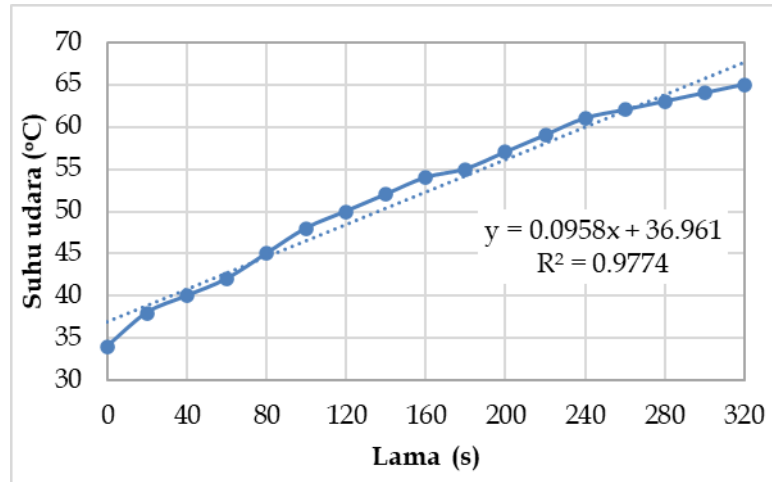
Katup udara dan gas

Berdasarkan hasil uji katup kolektor maka didapatkan hasil uji sebagai berikut:

Tabel 1. Suhu udara kolektor, sudut bukaan katup, dan kecepatan udara

Pemograman Sistem Kontrol		Hasil pengamatan		
Suhu Udara kolektor (°C)	Bukaan katup udara (deg)	Suhu Udara kolektor (°C)	Bukaan katup udara (deg)	Bukaan katup gas (deg)
<=37	0	30-38	0	90
38-49	30	39-50	30	60
50-60	60	51-61	60	30
>60	90	>61	90	0

Hasil uji (Tabel 1) menunjukkan bahwa bukaan katup udara dan gas sudah sesuai program yang dibuat yaitu tergantung suhu udara. Dampak dari program tersebut adalah uji katup dilakukan untuk mengetahui apakah daya terpasang (energi gas) pada tungku hasil perhitungan dapat meningkatkan suhu pada ruang pengering dengan cepat (kriteria ditetapkan 10 menit). Berdasarkan hasil uji katub kolektor dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 7. Suhu udara yang dihasilkan tungku pada laju pembakaran gas 6500J/s

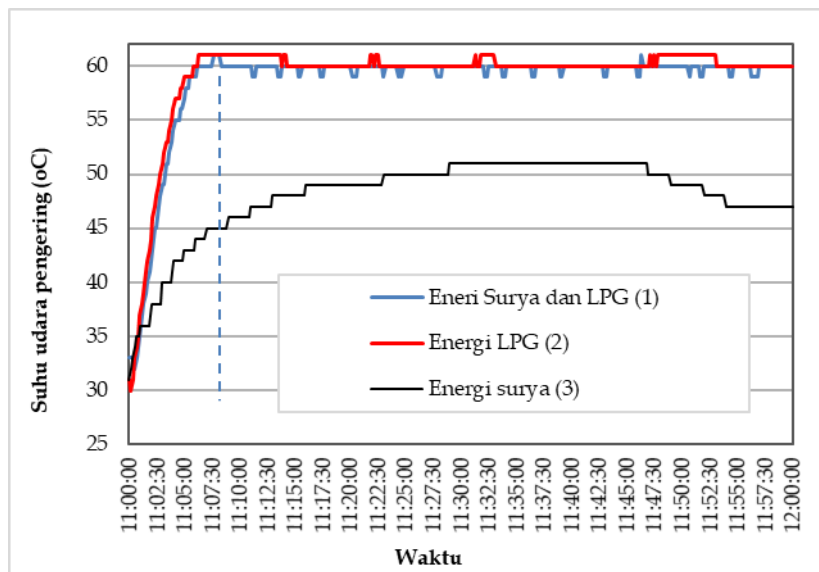
Dapat dilihat pada Gambar 7 bahwa daya terpasang maksimum pada tungku (6500J/s) mampu menaikkan suhu dari 34 sampai 65°C cukup cepat yaitu 320 detik (5,3 menit) atau laju kenaikan suhu 0.0958°C/s (5,75°C/menit). Hal ini menunjukkan bahwa *gain* tungku untuk mesin pengering cukup besar atau daya gas terpasang pada tungku dapat mendukung proses pengeringan hasil pertanian dengan kinerja yang baik.

Pengeringan dan konsumsi energi

Parameter yang diamati selama proses pengeringan adalah a) suhu udara pengering, b) kadar air sagu, dan c) konsumsi energi. Hasil pengamatan dapat dilihat pada Gambar 8, 9 dan 10.

Suhu udara pengering

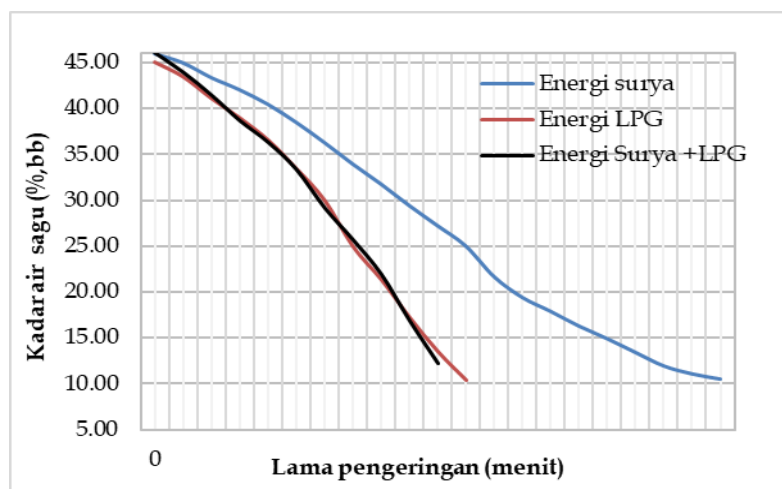
Hasil pengamatan respon transien dan keadaan tunak suhu udara pengering pada satu jam proses pengeringan sagu dapat dilihat pada Gambar 8. Pada gambar terlihat bahwa waktu menetap (*settling time*) suhu pada cara 1 dan 2 adalah sama yaitu 5 dan 3 menit. Namun pada cara 1 tidak terjadi *overshoot* dan cara 2 terjadi *overshoot* 1°C selama 9 dan 10 menit.



Gambar 8. Suhu udara pengering pada berbagai sumber energi tungku

Pada Gambar 8 juga dapat dilihat bahwa respon keadaan tunak cara 1 dan 2 pada umumnya sudah sesuai kriteria yaitu suhu udara pengering cukup stabil dan hanya beberapa kali terjadi *error steady state* sebesar 1°C (Ogata, 1997). Proses pemanasan dalam tungku atau pemanas ulang merupakan proses yang sangat intensif energi dengan banyak parameter operasi yang dapat dioptimalkan sehingga dapat menggunakan model kondisi tunak (Ahmed et al., 2019). Hal ini menunjukkan bahwa suhu udara pengering saat tungku menggunakan energi gas saja secara umum sama ketika tungku menggunakan energi hibrid surya dengan gas. Hal tersebut disebabkan oleh sistem kontrol cerdas dapat mengendalikan laju pembakaran gas sama baiknya. Akan tetapi jika dilihat cara 3, dimana suhu udara pengering tidak mencapai *set point* 60°C dan suhu tidak stabil. Hal ini menunjukkan bahwa energi surya yang berasal dari kolektor tidak dapat mendukung kinerja mesin yang baik, energi surya hanya baik digunakan jika dihybrid dengan energi gas.

Kadar air sagu

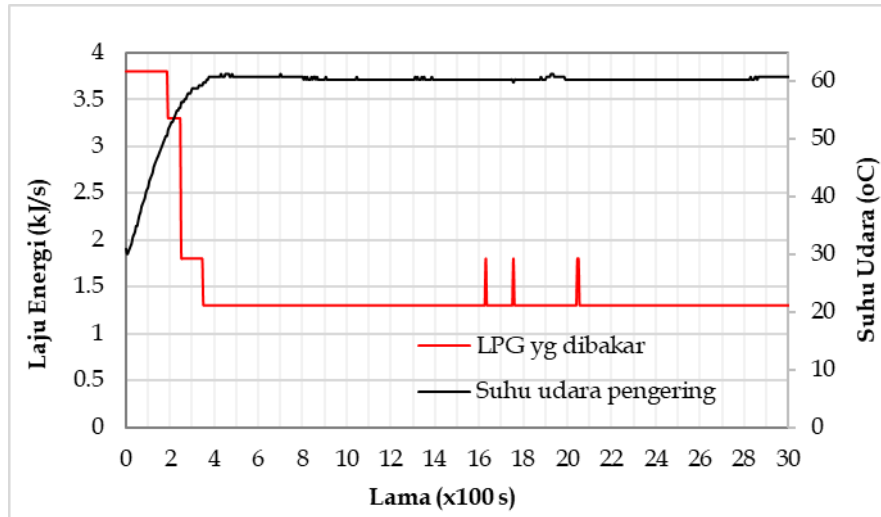


Gambar 9. Kadar air tepung sagu pada berbagai sumber energi tungku

Hasil pengamatan kadar air sagu dapat dilihat pada Gambar 9. Terlihat pada Gambar 9 bahwa lama proses pengeringan sampai kadar air sekitar 11% dengan tungku berenergi gas saja (non-hybrid) dan tungku berenergi surya dengan gas (hybrid) adalah sama yaitu 300 menit (5 jam), hal ini disebabkan oleh waktu menetap dan kestabilan suhu keduanya hampir sama (dapat dilihat Gambar 8). Lain halnya dengan pengujian dengan menggunakan energi surya saja, proses pengeringan membutuhkan waktu 600 menit (10 jam) atau 2 hari, hal ini disebabkan oleh energi surya yang dihasilkan kolektor tidak cukup untuk mengeringkan 10 kg sagu, walaupun, saat uji dilakukan rata-rata radasi surya cukup tinggi yaitu 750Watt/m² atau puncak musim kemarau. Ini berarti bahwa jika pengeringan dilakukan dengan energi surya saja pada musim tidak menentu, maka lama pengeringan akan lebih dari 2 hari. Proses pengeringan yang terjadi selama setiap perlakuan memengaruhi sebagian besar perbedaan kadar air yang terjadi. Kadar air awal bahan baku juga dapat memengaruhi kadar air produk (Ehara & Toyoda, 2018). Ketebalan bahan yang dikeringkan dan lamanya proses pengeringan juga memengaruhi hasil yang diperoleh dari bahan yang dikeringkan (Dinda Mar'atuzzahwa et al., 2023).

Konsumsi energi

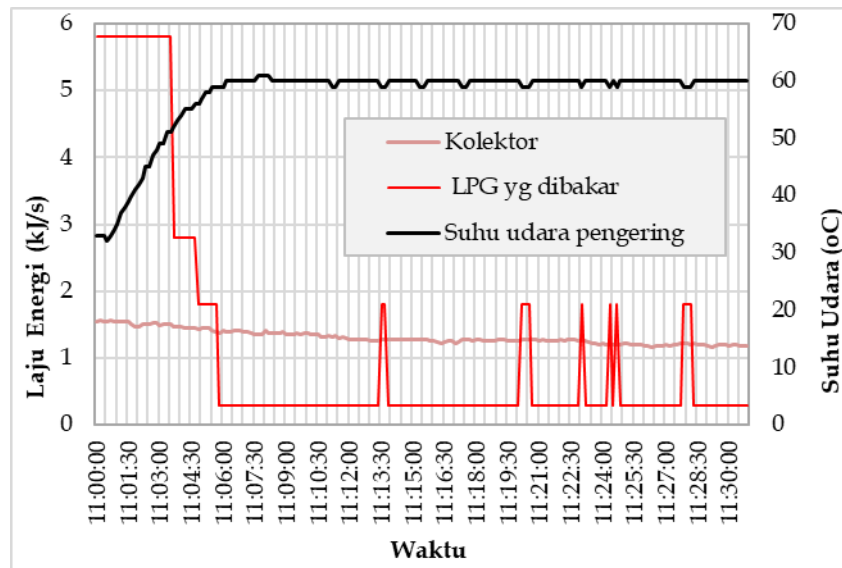
Pengukuran laju konsumsi gas dilakukan pada saat pengoperasian tungku secara non-hibrid dan hibrid. Hasil pengamatan pengoperasian secara non-hibrid dapat dilihat pada Gambar 10 berikut, pada gambar diketahui bahwa laju pembakaran gas menurun berangsur-angsur dengan naiknya suhu udara pengering dan konstan di 1,8kJ/s saat suhu udara pengering stabil di suhu 60°C. Hal ini menunjukkan bahwa sistem kontrol cerdas pada tungku telah berfungsi dengan sangat baik dalam memprediksi dan membakar gas dengan tepat.



Gambar 10. Laju konsumsi energi gas saat menerapkan sistem non-hibrid

Kandungan air dalam bahan yang dikeringkan menentukan konsumsi energi dan proses pengeringan (Soysal et al., 2009). Peningkatan daya tidak mempengaruhi perubahan konsumsi energi. Penggunaan daya yang tinggi menyebabkan penguapan air bahan menjadi tinggi, sehingga nilai konsumsi energi relatif sama setiap perlakuan (Song et al., 2016). Berdasarkan hasil pengukuran berat gas sebelum dan sesudah pengeringan diketahui bahwa proses pengeringan 10kg sagu mengkonsumsi 0,68kg gas atau besar laju penggunaan gas adalah 0,124 kg/jam. Berdasarkan hasil perhitungan energi yang digunakan dan dihasilkan tungku selama proses pengeringan sagu dapat diketahui bahwa efisiensi termal tungku mencapai 83%.

Hasil pengamatan pengoperasian tungku secara hibrid dapat dilihat pada Gambar 11 berikut, Nampak pada gambar bahwa laju pembakaran gas menurun berangsur-angsur dengan naiknya suhu dan selanjutnya laju konstan di 0,4kJ/s saat suhu udara pengering stabil di suhu 60°C. Hal ini menunjukkan bahwa sistem kontrol cerdas pada tungku telah berfungsi dengan sangat baik dalam memprediksi energi yang dibutuhkan dalam ruang pengering dan energi yang dihasilkan kolektor dan selanjutnya membakar gas dengan tepat.



Gambar 11. Laju konsumsi energi gas saat menerapkan sistem hybrid

Dari hasil pengukuran berat gas sebelum dan sesudah pengeringan 5 jam diketahui bahwa proses pengeringan sagu hanya membutuhkan 0,32kg gas atau besar laju penggunaan gas adalah 0,064kg/jam. Jika dibandingkan dengan mesin pengering berjalan non-hybrid dengan hibrid, maka diketahui bahwa metode hibrid dapat menghemat penggunaan gas sebesar 53%.

Biaya pengeringan

Biaya pengeringan dihitung hanya berdasarkan biaya listrik dan gas yang digunakan dalam proses pengeringan sagu. Listrik yang digunakan pada mesin pengering yang diuji adalah listrik untuk menghidupkan *blower* dan sistem kontrol. Perhitungan biaya listrik didasarkan pada besarnya daya *blower* (W) dan sistem kontrol (W), lama proses, dan harga listrik per kWh untuk golongan tarif listrik R1. Sedangkan biaya gas didasarkan pada berat gas yang digunakan dan harga gas per kg di pasaran.

Hasil pengamatan konsumsi gas dan listrik serta perhitungan biaya dapat dilihat pada Tabel 2. Berdasarkan pada Tabel 2 diketahui bahwa biaya pengeringan sagu dari kadar air 45-11% per kg saat mesin pengering menggunakan sistem hibrid adalah Rp.613,4/kg (cara 1), saat mesin pengering menggunakan gas saja adalah Rp.866,9/kg (cara 2), dan saat mesin pengering menggunakan surya saja adalah Rp.810,7/kg (cara 3). Nampak bahwa biaya pengeringan dengan sistem hibrid lebih murah dibanding pengeringan dengan menggunakan gas saja atau Surya saja (sistem non-hybrid).

Biaya pengering dengan tenaga surya cukup tinggi, biayanya hampir sama dengan menggunakan gas saja, hanya berbeda Rp.37. Tingginya biaya pengeringan dengan tenaga surya disebabkan oleh biaya listrik untuk menjalan *blower*

Lama *blower* beroperasi adalah 2 kali lebih lama dari waktu uji yang lain. Hal ini menunjukkan bahwa biaya pengeringan tidak hanya tergantung pada jumlah bahan bakar yang dikonsumsi tapi juga pada lama proses.

Tabel 2. Biaya pengeringan

Pengamatan dan Perhitungan	Hibrid	LPG	Surya
Berat sagu basah ($k_a=45\%$)	10	10	10
Lama proses (jam)	5	5	10
Konsumsi gas (kg)	0.32	0.68	0
Biaya gas (Rp.6500/kg) (Rp)	2.080	4.420	0
Daya blower 3 inch (W)	550	550	550
Daya sistem kontrol (W)	2,5	2,5	2,5
Konsumsi listrik (kWh)	2,763	2,763	5,525
Biaya Listrik (Rp) (Rp 1467.28/kWh)	4.054	4.054	8.107
Biaya pengeringan (Rp/kg)	613,4	847,4	810,7

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan pembahasan penelitian maka dapat disimpulkan bahwa kinerja mesin pengering saat dioperasikan secara hibrid dan non-hibrid (gas saja) dari aspek suhu sudah memenuhi kriteria yaitu tidak terjadi overshoot, waktu menetap yang pendek, suhu stabil, dan error steady state yang sangat kecil. Dari sisi konsumsi energi, sistem hibrid terbukti lebih hemat hingga 53% dibandingkan sistem non-hibrid. Biaya pengeringan dengan sistem hibrid lebih murah yaitu Rp613,4/kg dibandingkan non-hibrid (Rp810,7 - Rp866,9/kg). Penggunaan energi surya saja membutuhkan waktu 2 kali lebih lama untuk proses pengeringan dibandingkan sistem hibrid dan non-hibrid. Secara keseluruhan dapat disimpulkan bahwa sistem hibrid energi surya dan LPG menghasilkan kinerja alat pengering yang lebih optimal dan efisien dibandingkan sistem non-hibrid baik dari sisi teknis maupun ekonomis.

Saran

Disarankan untuk mengoperasikan mesin pengering dalam mode hibrid jika bahan yang dikeringkan memiliki kadar air tinggi dan membutuhkan suhu di atas 50°C. Sementara itu, penerapan mode non-hibrid dapat dipertimbangkan hanya jika bahan yang dikeringkan berkadar air rendah, membutuhkan suhu di bawah 50°C, dan terdapat ketersediaan energi surya yang memadai.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kepada CV. Karya Mesin Utama atas dukungan fasilitas yang telah diberikan dalam mendukung proses perakitan dan pengujian performa alat.

PENDANAAN

Penelitian ini tidak menerima pendanaan eksternal.

CONFLICT OF INTEREST

Penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan dengan pihak mana pun.

DAFTAR REFERENSI

- Ahmed, Z., Lecompte, S., De Raad, T., & De Paepe, M. (2019). Steady State model of a Reheating Furnace for determining slab boundary conditions. *Energy Procedia*, 158, 5844–5849. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.542>
- Alva, G., Lin, Y., & Fang, G. (2018). An overview of thermal energy storage systems. *Energy*, 144, 341–378. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.12.037>
- Alva, G., Liu, L., Huang, X., & Fang, G. (2017). Thermal energy storage materials and systems for solar energy applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68(August 2016), 693–706. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.021>
- Asiah, N., & Djaeni, M. (2021). Konsep Dasar Proses Pengeringan Pangan. In *Malang: AE Publishing*. [file:///C:/Users/Asus/Downloads/Ebook-Konsep Dasar Proses Pengeringan Pangan.pdf](file:///C:/Users/Asus/Downloads/Ebook-Konsep%20Dasar%20Proses%20Pengeringan%20Pangan.pdf)
- Bal, L. M., Satya, S., Naik, S. N., & Meda, V. (2011). Review of solar dryers with latent heat storage systems for agricultural products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 876–880. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.09.006>
- Bala, B. K., & Mondol, M. R. A. (2001). Experimental investigation on solar drying of fish using solar tunnel dryer. *Drying Technology*, 19(2), 427–436. <https://doi.org/10.1081/DRT-100102915>
- Dinda Mar'atuzzahwa, I Made Supartha Utama, & I Putu Surya Wirawan. (2023). Pengaruh Ketebalan dan Suhu Pengeringan Terhadap Karakter Fisik dan Sensoris Buah NagaMerah Kering. *Jurnal Beta (Biosistem Dan Teknik Pertanian)*, 11(1), 50–61.
- Ehara, H., & Toyoda, Y. (2018). *Sago Palm Multiple Contributions to Food Security and Sustainable Livelihoods by Hiroshi Ehara, Yukio Toyoda, Dennis V. Johnson (eds.) (z-lib.org).pdf*.
- El-shal, S. M., Morris, A. S., Lin, C. H., & Huang, C. L. (2000). A fuzzy expert system for fault detection in statistical process control of industrial processes - *Systems, Man, and Cybernetics, Part C, IEEE Transactions on*. 30(2), 281–289.
- Erlina, D. M., & Tazi, I. (2009). *Test model of a rack-type dryer with a solar collector (case study for drying red chili (Capsium annum Var. Longum))*. 2(1).
- Fuso Nerini, F., Howells, M., Bazilian, M., & Gomez, M. F. (2014). Rural electrification options in the Brazilian Amazon. A multi-criteria analysis. *Energy for Sustainable Development*, 20(1), 36–48. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2014.02.005>
- Gupta, A., Saini, R. P., & Sharma, M. P. (2008). Hybrid energy system for remote area - An action plan for cost effective power generation. *IEEE Region 10 Colloquium and 3rd International Conference on Industrial and Information Systems, ICIIS 2008*. <https://doi.org/10.1109/ICIINFS.2008.4798396>
- Hadji, T., Agung, S., Nadjib, M., Faiz, H., Kinayung, T., & Elpa, F. (2022). *Penentuan Nilai Kalor Eksperimental LPG dengan Variasi Udara*. 6(1), 37–47.

- Kant, K., Shukla, A., Sharma, A., Kumar, A., & Jain, A. (2016). Thermal energy storage based solar drying systems: A review. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 34, 86–99. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.01.007>
- Lakshmi, D. V. N., Muthukumar, P., Layek, A., & Nayak, P. K. (2018). Drying kinetics and quality analysis of black turmeric (*Curcuma caesia*) drying in a mixed mode forced convection solar dryer integrated with thermal energy storage. *Renewable Energy*, 120, 23–34. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.12.053>
- Murali, S., Amulya, P. R., Alfiya, P. V., Delfiya, D. S. A., & Samuel, M. P. (2020). Design and performance evaluation of solar - LPG hybrid dryer for drying of shrimps. *Renewable Energy*, 147(October 2021), 2417–2428. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.002>
- Nallusamy, N., Sampath, S., & Velraj, R. (2007). Experimental investigation on a combined sensible and latent heat storage system integrated with constant/varying (solar) heat sources. *Renewable Energy*, 32(7), 1206–1227. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.04.015>
- Nwakuba, N. R., Asoegwu, S. N., & Nwaigwe, K. N. (2016). Energy consumption of agricultural dryers: An overview. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 18(4), 119–132.
- Ogata, K. (1997). Modern Control Engineering, Third Edition. In *Prentice-Hall: United States of America* (p. 20).
- Okoroigwe, E. C., N., E. M., & U., U. H. (2013). Design and evaluation of combined solar and biomass dryer for small and medium enterprises for developing countries. *International Journal of Physical Sciences*, 8(25), 1341–1349. <https://doi.org/10.5897/IJPS2013.3937>
- Osintsev, K., Aliukov, S., Kuskarbekova, S., Tarasova, T., Karelin, A., Konchakov, V., & Korniyakova, O. (2023). Increasing Thermal Efficiency: Methods, Case Studies, and Integration of Heat Exchangers with Renewable Energy Sources and Heat Pumps for Desalination. *Energies*, 16(13). <https://doi.org/10.3390/en16134930>
- Rawung, F. G., Ludong, D. P. M., & Lengkey, L. C. C. E. (2021). Karakteristik Pengeringan Sagu Menggunakan Alat Pengering Tenaga Surya Tipe Rak 1) Characteristics of Drying Sago Using a Rack-Type Solar Dryer. *Jurusan Teknologi Pertanian Fakultas Pertanian Universitas Sam Ratulangi Manado*.
- Saputra, R. A., Ilham, M. M., & Fauzi, S. (2021). Rancang Bangun Sistem Penggerak Mesin Pengering Cengkeh Kapasitas 15 Kg. *Seminar Nasional Inovasi Teknologi*, 95–100.
- Song, Z., Jing, C., Yao, L., Zhao, X., Wang, W., Mao, Y., & Ma, C. (2016). Microwave drying performance of single-particle coal slime and energy consumption analyses. *Fuel Processing Technology*, 143, 69–78. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.11.012>
- Soysal, Y., Arslan, M., & Keskin, M. (2009). Intermittent microwave-convective air drying of oregano. *Food Science and Technology International*, 15(4), 397–406. <https://doi.org/10.1177/1082013209346588>

- Tika, Y. Y. (2022). Mekanisme Beberapa Mesin Pengering Pertanian. *Jurnal Penelitian Fisika Dan Terapannya (JUPITER)*, 4(1), 20. <https://doi.org/10.31851/jupiter.v4i1.7975>
- Udomkun, P., Romuli, S., Schock, S., Mahayothee, B., Sartas, M., Wossen, T., Njukwe, E., Vanlauwe, B., & Müller, J. (2020). Review of solar dryers for agricultural products in Asia and Africa: An innovation landscape approach. *Journal of Environmental Management*, 268(May), 110730. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110730>
- Wang, J. J., Jing, Y. Y., Zhang, C. F., & Zhao, J. H. (2009). Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2263–2278. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.06.021>
- Widaningrum, W., Purwati, E. Y., & Munarso, S. J. (2005). Kajian Terhadap Sni Mutu Pati Sagu. *Jurnal Standardisasi*, 7(2), 91. <https://doi.org/10.31153/js.v7i3.34>
- Woldeyohannes, A. D., Woldemichael, D. E., & Baheta, A. T. (2016). Sustainable renewable energy resources utilization in rural areas. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 66, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.07.013>