



## THERMAL ANALYSIS AND PERFORMANCE OF AN ACTIVE SOLAR DRYER SYSTEM BASED ON SOLAR PANELS FOR IMPROVING THE QUALITY OF COCOA BEAN DRYING

Nely Ana Mufarida<sup>1\*</sup>, Sofia Ariyani<sup>2</sup>, Nurhalim<sup>1</sup>, Sutikno<sup>2</sup>, Ulya Anisatur Rosydah<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Jember

<sup>2</sup> Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Jember

<sup>3</sup> Sistem Informasi Universitas Muhammadiyah Jember

Karimata Street No. 49 Jember, Jawa Timur, 68121

\*Corresponding Author's Email: [nelyana@unmuhjember.ac.id](mailto:nelyana@unmuhjember.ac.id)

Received: 12 December 2025.

Revised: 16 December 2026.

Accepted: 31 March 2026.

### Abstract

Cocoa is a leading Indonesian commodity, but the quality of its beans remains low due to traditional drying methods that depend on the weather, often resulting in moisture content that falls short of the standard 6–8%. This research developed a direct-type active solar dryer based on solar energy to improve the efficiency and quality of cocoa bean drying. The system was designed using a 200–300 Wp solar panel, a 12 V battery, a 150 W heater, an exhaust fan, and an Arduino-based automatic control system to regulate temperature, humidity, and airflow. Test results showed that the drying chamber temperature reached 45–60°C with an air velocity of 1.5–2.5 m/s. Cocoa beans with an initial moisture content of 45–55% could be dried to 6–8% in 20–24 hours at a temperature of 50–55°C and an air velocity of 2.0–2.5 m/s. The system's thermal efficiency reached 28–42%, higher than conventional drying ( $\pm 10\%$ ), which requires 4–6 days. Statistical analysis using ANOVA and multiple linear regression showed that temperature and air velocity significantly influenced drying time ( $p < 0.05$ ). The beans' quality was more uniform, hygienic, and the fermented aroma was maintained. This system has the potential to be implemented on a farmer and UMKM as a sustainable drying solution based on renewable energy.

*Keyword: cocoa; active solar dryer; solar energy; drying; bean quality*

Copyright: ©2026 The authors. This article is published by LPPM and is licensed under the CC BY 4.0 license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## PENDAHULUAN

Kakao (*Theobroma cacao L.*) merupakan salah satu komoditas perkebunan penting yang memiliki peranan strategis dalam perekonomian nasional [1]. Selain sebagai penyedia lapangan kerja dan sumber devisa negara, kakao juga diharapkan mampu memberikan pendapatan berkelanjutan bagi petani di berbagai wilayah Indonesia [2]. Potensi tersebut muncul karena tanaman kakao dapat berbuah dan dipanen sepanjang tahun, meskipun dengan volume panen yang berfluktuasi setiap bulan [3].

Pada tahun 2022, struktur pengelolaan kakao nasional masih didominasi oleh Perkebunan Rakyat (PR) yang berkontribusi sebesar 99,63% dari total luas areal kakao di Indonesia, menunjukkan bahwa sektor rakyat masih menjadi tulang punggung produksi nasional [4].

Salah satu faktor utama penyebab menurunnya produktivitas kakao nasional adalah pengelolaan pascapanen yang belum optimal, khususnya pada tahap pengeringan biji kakao [5]. Proses pengeringan merupakan tahap penting karena berfungsi untuk menurunkan kadar air biji hasil fermentasi agar tahan

lama dan tidak mudah berjamur [6]. Biji kakao segar memiliki kadar air tinggi, berkisar antara 51–60%, sehingga sangat rentan terhadap pertumbuhan mikroorganisme pembusuk [7].

Menurut Tanggasari dkk. proses pengeringan bertujuan menurunkan kadar air hingga mencapai 6–7%, yaitu kisaran kadar air ideal untuk mencegah pertumbuhan jamur dan memperpanjang daya simpan [8]. Pengeringan dilakukan dengan prinsip perpindahan panas dan uap air secara simultan, di mana energi panas diperlukan untuk menguapkan air dari permukaan bahan [9]. Bila pengeringan tidak optimal, biji kakao akan mengalami perubahan warna, cita rasa, serta penurunan mutu yang signifikan [10].

Kondisi cuaca juga menjadi faktor pembatas dalam proses pengeringan tradisional yang masih bergantung pada sinar matahari langsung [11]. Ketika cuaca lembap atau hujan, proses pengeringan menjadi lebih lama dan risiko pertumbuhan jamur meningkat [12]. Menurut Abdurrisal dkk., kualitas biji kakao menurun drastis apabila waktu pengeringan melebihi durasi ideal akibat cuaca tidak menentu [13]. Pengeringan umumnya dilakukan setelah proses fermentasi dengan kapasitas minimal 40 kg biji kakao per proses [14].

Dengan demikian, peningkatan efisiensi dan kontrol pada proses pengeringan pascapanen menjadi hal yang sangat penting. Upaya inovatif melalui pengembangan teknologi pengering berbasis energi surya (*solar dryer*) diharapkan mampu meningkatkan efisiensi energi, menekan ketergantungan terhadap cuaca, dan menjaga mutu biji kakao agar memenuhi standar ekspor.

Rumusan permasalahan dalam penelitian ini berfokus pada pengembangan dan evaluasi sistem pengering biji kakao berbasis energi surya. Permasalahan pertama adalah bagaimana merancang sistem *solar dryer* aktif yang efisien, ramah lingkungan, dan mampu mengoptimalkan proses pengeringan biji kakao. Permasalahan kedua berkaitan dengan bagaimana pengaruh pengaturan suhu udara, kecepatan aliran udara, serta kelembapan relatif terhadap kualitas hasil pengeringan, baik dari segi waktu pengeringan maupun mutu fisik dan sensoris biji kakao. Permasalahan ketiga adalah bagaimana performa alat pengering *solar dryer* aktif jika dibandingkan dengan metode pengeringan konvensional, khususnya dalam hal efisiensi waktu, efisiensi energi, tingkat higienitas, dan konsistensi mutu hasil pengeringan. Pendekatan yang digunakan dalam penelitian ini menggabungkan rekayasa teknologi energi terbarukan dan analisis eksperimental termal [15].

Tahapan penelitian ini meliputi beberapa langkah utama yang dilakukan secara sistematis. Tahap pertama adalah perancangan dan pembuatan prototipe *solar dryer* aktif tipe langsung yang memanfaatkan energi surya melalui panel surya untuk menggerakkan exhaust fan serta heater tambahan sebagai sumber panas pendukung. Tahap kedua adalah pengujian eksperimental dengan memvariasikan suhu udara pengering, kecepatan aliran udara, dan kelembapan relatif guna memperoleh kombinasi kondisi operasi yang paling optimal. Tahap ketiga berupa analisis data yang mencakup perhitungan efisiensi pengeringan, laju penurunan kadar air, waktu pengeringan, serta evaluasi kualitas fisik dan kimia biji kakao setelah proses pengeringan. Tahap terakhir adalah evaluasi performa sistem dengan membandingkan hasil pengeringan menggunakan *solar dryer* aktif terhadap metode pengeringan tradisional untuk menilai efektivitas, efisiensi, dan mutu hasil yang diperoleh.

Berbagai penelitian terdahulu telah berupaya mengatasi kelemahan metode tradisional dengan mengembangkan *solar dryer* untuk berbagai komoditas pertanian. Pongsapan dkk., meneliti sistem *passive solar dryer* untuk pengeringan cabai, yang menunjukkan efisiensi termal 28–35%, namun suhu ruang pengering berfluktuasi (35–65°C) dan menghasilkan kadar air akhir yang tidak seragam. Hasil tersebut menyarankan penggunaan sistem kontrol aktif untuk kestabilan suhu [16].

Harianda dkk., melakukan studi komparatif antara sistem pasif dan aktif pada pengeringan jagung. Hasilnya menunjukkan bahwa sistem pengering aktif dengan kipas bertenaga surya mampu

meningkatkan efisiensi energi dari 22% menjadi 44%, serta menghasilkan kadar air akhir jagung yang lebih konsisten (12–13%) [17].

Nurlaila dkk., mengembangkan *direct solar dryer* dengan tambahan bahan penyimpan panas (*phase change material* atau PCM), yang meningkatkan stabilitas suhu selama kondisi berawan dan menghemat waktu pengeringan hingga 25%. Namun, tanpa kontrol aktif, kelembapan masih sulit dijaga konstan [18].

Sementara itu, Indra Yusman dkk., menguji sistem *hybrid solar-assisted dryer* untuk pengeringan biji kopi. Penggunaan kombinasi energi surya dan pemanas listrik tambahan mampu menjaga suhu stabil pada 50–55°C dan meningkatkan efisiensi pengeringan hingga 40% dibanding sistem pasif [19].

Penelitian terbaru oleh Sutrisno dkk., berhasil mengembangkan solar dryer aktif otomatis dengan sistem kontrol suhu dan kelembapan berbasis sensor. Sistem ini mampu menjaga suhu stabil di kisaran 55–60°C, menurunkan kadar air cabai hingga <10% dalam waktu 6 jam, meningkatkan efisiensi energi hingga 50% dibanding sistem pasif, serta menghasilkan warna cabai yang lebih cerah dan seragam [20].

Berdasarkan kajian tersebut, dapat disimpulkan bahwa inovasi solar dryer aktif tipe langsung berbasis energi surya dengan sistem kontrol otomatis sangat potensial diterapkan pada pengeringan biji kakao. Teknologi ini dapat meningkatkan efisiensi energi, mempercepat proses pengeringan, dan menjaga mutu biji kakao, sehingga mendukung peningkatan daya saing produk kakao Indonesia di pasar global.

Kebaruan (*novelty*) dalam penelitian ini terletak pada pengembangan sistem solar dryer aktif tipe langsung yang mengintegrasikan panel surya, exhaust fan, dan heater berbasis energi terbarukan sehingga mampu beroperasi secara mandiri tanpa ketergantungan pada listrik dari jaringan umum. Selain itu, sistem ini dilengkapi dengan pemantauan dan pengendalian parameter pengeringan secara real time, meliputi suhu, kelembapan relatif, dan kecepatan aliran udara, guna menjaga stabilitas proses dan menghasilkan kondisi pengeringan yang optimal. Kebaruan lainnya adalah dilakukannya analisis performa termal serta evaluasi mutu fisik dan sensoris biji kakao secara eksperimental, yang masih terbatas penerapannya pada penelitian pengeringan komoditas kakao di Indonesia.

## METODE PENELITIAN

### 1. Desain Penelitian

Penelitian ini bersifat eksperimental dan rekayasa terapan, dengan fokus pada perancangan, pembuatan, dan pengujian alat pengering solar dryer aktif tipe langsung berbasis energi surya untuk pengeringan biji kakao fermentasi [21]. Tujuan utama penelitian ini adalah meningkatkan efisiensi proses pengeringan serta menjaga mutu fisik dan kimia biji kakao pascapanen. Tahapan penelitian ini dilakukan secara sistematis dimulai dari studi literatur dan identifikasi permasalahan di lapangan untuk memahami kondisi aktual proses pengeringan biji kakao serta kebutuhan teknologinya. Selanjutnya dilakukan perancangan alat pengering solar dryer aktif berbasis energi surya yang disesuaikan dengan kebutuhan operasional dan ketersediaan energi. Setelah desain ditetapkan, tahap berikutnya adalah pembuatan dan perakitan prototipe sesuai spesifikasi teknis yang telah direncanakan. Prototipe kemudian diuji secara eksperimental dengan memvariasikan parameter pengeringan, seperti suhu, kecepatan aliran udara, dan kelembapan relatif, untuk memperoleh kondisi kerja yang optimal. Data hasil pengujian dianalisis untuk menghitung efisiensi sistem serta mengevaluasi mutu hasil pengeringan. Tahap akhir penelitian adalah evaluasi kinerja alat secara menyeluruh dan penyusunan model optimalisasi sistem sebagai dasar pengembangan dan penerapan lebih lanjut.

## 2. Bahan dan Alat Penelitian

Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah biji kakao fermentasi dengan kadar air awal berkisar antara 45–55% sebagai objek pengujian proses pengeringan. Sistem pengering yang digunakan terdiri atas beberapa komponen utama, yaitu panel surya sebagai sumber energi utama, battery pack sebagai penyimpan energi, dan charge controller untuk mengatur proses pengisian daya. Selain itu, digunakan heater listrik sebagai sumber panas tambahan, exhaust fan untuk mengatur sirkulasi dan kecepatan aliran udara, serta sensor suhu dan kelembapan untuk memantau kondisi ruang pengering secara real time. Ruang pengering dirancang menggunakan material kaca untuk memaksimalkan penyerapan radiasi matahari dan aluminium reflektor untuk meningkatkan efisiensi pemantulan panas di dalam ruang pengering.

Peralatan Utama:

Alat utama yang digunakan adalah prototipe solar dryer aktif.



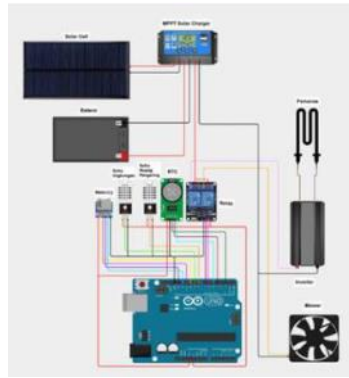
Gambar 1. Prototipe solar dryer aktif

Keterangan gambar :

1. Bagian rangka
2. Atap Polycarbonate
3. Rangka ruang pengering
4. Panel control
5. Exhaust fan
6. Solar cell
7. Heater

Alat pengering dirancang dengan rangka baja profil kotak berdimensi 200 cm × 200 cm × 70 cm. Atap menggunakan polikarbonat transparan setebal 6 mm dengan sudut kemiringan 25. Terdapat empat kotak penampung biji kakao aluminium berlubang (90 cm × 90 cm × 2.5 cm), masing-masing berkapasitas 10 kg. Panel surya, exhaust fan, dan heater dioperasikan oleh energi listrik dari panel surya yang disimpan dalam baterai.

Unit kontrol berbasis Arduino Uno R3 Mega328p mengintegrasikan modul relay, RTC, SD card reader, sensor DHT22, solar charger control, dan inverter.



Gambar 2. Wiring Unit Control

#### Peralatan pendukung:

Peralatan pendukung yang digunakan dalam penelitian ini meliputi anemometer untuk mengukur kecepatan aliran udara di dalam ruang pengering, serta digital hygrometer untuk memantau kelembapan relatif selama proses pengeringan berlangsung. Pengukuran suhu dilakukan menggunakan thermocouple yang terhubung dengan data logger sehingga pencatatan data suhu dapat dilakukan secara otomatis dan kontinu. Selain itu, digunakan timbangan digital presisi untuk mengukur perubahan massa biji kakao selama proses pengeringan guna menentukan penurunan kadar air. Seluruh data yang diperoleh kemudian diolah dan dianalisis menggunakan laptop sebagai perangkat akuisisi dan pengolahan data.

### 3. Tahapan Penelitian

#### *Tahap 1. Studi Pendahuluan dan Analisis Kebutuhan*

Tahap awal penelitian diawali dengan studi pendahuluan melalui survei lapangan dan wawancara dengan petani kakao untuk mengidentifikasi berbagai kendala yang dihadapi dalam proses pengeringan tradisional, seperti ketergantungan terhadap cuaca, lamanya waktu pengeringan, serta risiko kontaminasi. Selanjutnya dilakukan kajian literatur terkait karakteristik termal pengeringan biji kakao dan perkembangan teknologi solar dryer yang telah dikembangkan sebelumnya sebagai dasar perancangan sistem. Berdasarkan hasil survei dan kajian literatur, ditetapkan parameter desain yang sesuai dengan kebutuhan praktis di lapangan, yaitu suhu kerja optimal pada kisaran 45–60°C, target waktu pengeringan 20–30 jam, serta kapasitas alat yang disesuaikan dengan kebutuhan operasional petani kakao.

#### *Tahap 2. Perancangan Alat Solar Dryer Aktif*

Pada tahap ini dilakukan perancangan alat solar dryer aktif tipe langsung dengan ruang pengering yang menggunakan kaca transparan sebagai atap guna memaksimalkan penyerapan dan efek rumah kaca dari energi surya. Sistem dilengkapi dengan exhaust fan untuk meningkatkan sirkulasi udara di dalam ruang pengering serta mempercepat proses pengeluaran uap air dari bahan. Selain itu, ditambahkan heater berbasis energi surya sebagai sumber panas tambahan untuk menjaga kestabilan suhu ketika intensitas radiasi matahari menurun. Seluruh komponen diintegrasikan dengan sistem kendali otomatis berbasis Arduino Uno yang berfungsi mengatur suhu dan kinerja kipas secara real time sesuai kondisi pengeringan. Pada tahap ini juga dilakukan perhitungan kebutuhan daya listrik serta analisis efisiensi konversi energi surya guna memastikan sistem dapat beroperasi secara optimal dan mandiri.

### *Tahap 3. Pembuatan dan Uji Coba Awal Prototipe*

Pada tahap ini dilakukan proses fabrikasi prototipe solar dryer aktif menggunakan bahan yang mudah diperoleh di pasaran lokal, seperti besi ringan untuk rangka, aluminium sebagai reflektor panas, dan kaca sebagai penutup ruang pengering. Setelah perakitan selesai, dilakukan kalibrasi terhadap sensor suhu dan kelembapan guna memastikan akurasi pengukuran selama proses pengujian. Selanjutnya dilakukan uji fungsional awal tanpa beban untuk mengevaluasi distribusi suhu di dalam ruang pengering, efisiensi penyerapan panas dari radiasi matahari, serta kestabilan daya listrik yang dihasilkan oleh panel surya dan sistem penyimpanan energi.

### *Tahap 4. Pengujian Eksperimental*

Uji eksperimental dilakukan terhadap biji kakao fermentasi dengan memvariasikan tiga variabel utama, yaitu suhu pengeringan pada 45°C, 50°C, dan 55°C, kecepatan aliran udara sebesar 1,5 m/s, 2,0 m/s, dan 2,5 m/s, serta kelembapan relatif udara dalam rentang 30–50%. Selama proses pengeringan, beberapa parameter diamati secara sistematis, meliputi laju penurunan kadar air per jam, waktu total yang dibutuhkan hingga mencapai kadar air akhir 6–8%, serta efisiensi termal sistem dalam bentuk persentase. Selain parameter kuantitatif, dilakukan pula evaluasi mutu secara kualitatif terhadap perubahan warna, aroma, dan tekstur biji kakao setelah pengeringan. Seluruh hasil pengujian kemudian dibandingkan dengan metode pengeringan konvensional melalui penjemuran langsung untuk menilai tingkat peningkatan efisiensi proses serta kualitas produk yang dihasilkan.

### *Tahap 5. Analisis Data*

Analisis data dilakukan menggunakan metode statistik deskriptif dan komparatif. Efisiensi pengeringan dihitung menggunakan persamaan:

$$\eta = \frac{m_{air} \times L_v}{Q_{total}} \times 100\%$$

di mana  $m_{air}$  adalah massa air yang diuapkan (kg),  $L_v$  adalah kalor laten penguapan air ( $\pm 2260$  kJ/kg pada  $\pm 50^\circ\text{C}$ ), dan  $Q_{total}$  adalah total energi yang diserap sistem (kJ).

Analisis ANOVA (Analysis of Variance) digunakan untuk menguji pengaruh variabel bebas (suhu, kecepatan udara, dan kelembapan relatif) terhadap variabel terikat (waktu pengeringan). Hubungan antara suhu, kecepatan udara, dan kelembapan relatif terhadap waktu pengeringan dianalisis menggunakan regresi linier berganda. Uji signifikansi dilakukan menggunakan ANOVA pada tingkat kepercayaan 95% ( $\alpha = 0,05$ ). Kondisi operasi optimal ditentukan berdasarkan kombinasi waktu tercepat, efisiensi tertinggi, dan mutu terbaik.

### *Tahap 6. Evaluasi dan Penyusunan Model Optimalisasi*

Evaluasi dilakukan untuk menentukan konfigurasi sistem terbaik berdasarkan hasil eksperimen. Selain itu, dinilai potensi penerapan alat pada skala petani dan UMKM, disusun model matematis hubungan antar variabel pengeringan, serta dirumuskan rekomendasi desain sistem solar dryer aktif yang efisien dan berkelanjutan.

## **HASIL DAN PEMBAHASAN**

### **1. Hasil Perancangan dan Kinerja Awal Sistem Solar Dryer Aktif**

Prototipe solar dryer aktif tipe langsung berhasil dirancang dengan panel surya 200–300 Wp, baterai 12 V, heater 150 W, dan kendali otomatis berbasis Arduino. Suhu ruang pengering mencapai 45–60°C pada radiasi 650–850 W/m<sup>2</sup> dengan distribusi merata (selisih 2–4°C antar rak). Kecepatan udara 1,5–

2,5 m/s dan heater mampu menstabilkan suhu saat radiasi menurun. Sistem memenuhi kebutuhan operasional pengeringan kakao fermentasi.

## 2. Hasil Pengeringan Biji Kakao Berdasarkan Variasi Suhu, Aliran Udara, dan Kelembapan

### a. Penurunan Kadar Air

Pada kondisi awal kadar air 45–55%, biji kakao mengalami penurunan kadar air yang berbeda sesuai perlakuan dan waktu pengeringan diperoleh::

Tabel 1. Waktu Pengeringan

| Suhu (°C) | Kecepatan Udara (m/s) | Waktu Pengeringan (jam) |
|-----------|-----------------------|-------------------------|
| 45        | 1,5                   | 30–32                   |
| 50        | 2,0                   | 24–26                   |
| 55        | 2,5                   | 20–22                   |

Semakin tinggi suhu dan kecepatan udara, semakin cepat proses pengeringan. Namun suhu >55°C menurunkan mutu sensoris. RH 30–35% menghasilkan laju tercepat, sedangkan RH 45–50% memperlambat proses karena gradien uap air mengecil.

## 3. Efisiensi Termal Sistem Solar Dryer Aktif

Tabel 2. Perbandingan metode penjemuran

| Metode                  | Waktu Pengeringan | Efisiensi Termal | Tingkat Kontaminasi    | Konsistensi Mutu |
|-------------------------|-------------------|------------------|------------------------|------------------|
| Solar dryer aktif       | 20–26 jam         | 28–42%           | Sangat rendah          | Tinggi           |
| Penjemuran konvensional | 4–6 hari          | ±10%             | Tinggi (debu/serangga) | Rendah           |

Efisiensi termal rata-rata 28–42%, tertinggi pada suhu 50–55°C dan aliran 2,0–2,5 m/s. Dibanding penjemuran konvensional (±10%, 4–6 hari), solar dryer aktif lebih cepat (20–26 jam), higienis, dan konsisten.

Hasil ini menunjukkan solar dryer aktif jauh lebih efisien dan higienis.

## 4. Kualitas Fisik dan Sensoris Biji Kakao

Evaluasi mutu menunjukkan bahwa penggunaan solar dryer aktif memberikan peningkatan kualitas fisik dan sensoris biji kakao dibandingkan metode konvensional. Pada suhu 50–55°C, warna biji kakao tampak lebih seragam dan tidak mengalami gejala terbakar akibat panas berlebih. Aroma fermentasi tetap terjaga karena proses pengeringan berlangsung stabil tanpa overheating, sehingga senyawa volatil khas kakao tidak mengalami kerusakan signifikan. Dari segi tekstur, biji kakao menjadi lebih renyah dan mudah dipatahkan ketika mencapai kadar air akhir 6–8%, yang menunjukkan tingkat kekeringan yang sesuai standar. Selain itu, proses pengeringan dalam ruang tertutup mampu mencegah kontaminasi debu maupun benda asing yang umum terjadi pada penjemuran langsung. Secara keseluruhan, mutu terbaik diperoleh pada kombinasi suhu 50°C dan kecepatan aliran udara 2,0 m/s, yang memberikan keseimbangan optimal antara waktu pengeringan dan kualitas akhir produk.

## 5. Hasil Analisis Statistik

### a. ANOVA

Uji ANOVA menunjukkan bahwa:

Hipotesis diuji pada  $\alpha = 0,05$ . Hasil menunjukkan F-hitung suhu dan kecepatan udara lebih besar dari F-tabel serta  $p < 0,05$ , sehingga berpengaruh signifikan terhadap waktu pengeringan. RH juga signifikan namun kontribusinya lebih kecil. Interaksi suhu dan kecepatan udara menunjukkan efek sinergis dalam mempercepat pengeringan.

Hasil Perhitungan ANOVA

| Variabel        | F-hitung | F-tabel ( $\alpha=0,05$ ) | p-value | Keterangan |
|-----------------|----------|---------------------------|---------|------------|
| Suhu            | 18,45    | 3,35                      | 0,001   | Signifikan |
| Kecepatan udara | 15,72    | 3,35                      | 0,002   | Signifikan |
| RH              | 6,84     | 3,35                      | 0,021   | Signifikan |
| Interaksi T×V   | 9,11     | 3,35                      | 0,008   | Signifikan |

Karena F-hitung  $>$  F-tabel dan p-value  $<$  0,05, maka  $H_0$  ditolak. Artinya suhu, kecepatan udara, dan kelembapan relatif berpengaruh signifikan terhadap waktu pengeringan.

Dengan adanya perhitungan efisiensi yang terukur serta analisis ANOVA yang dilakukan secara rinci, dapat disimpulkan bahwa sistem solar dryer aktif menunjukkan kinerja termal yang nyata dan dapat dibuktikan secara kuantitatif. Hasil analisis statistik menegaskan bahwa variabel suhu dan kecepatan aliran udara merupakan faktor dominan yang secara signifikan memengaruhi waktu pengeringan dan laju penurunan kadar air. Selain itu, model regresi linier berganda yang diperoleh mampu menggambarkan hubungan antarvariabel secara matematis, sehingga berpotensi digunakan sebagai dasar pengembangan sistem pengendalian otomatis berbasis mikrokontroler untuk mengoptimalkan proses pengeringan secara real time.

### b. Regresi Linier Berganda

Hasil analisis regresi linier berganda menunjukkan adanya hubungan yang jelas antara parameter pengeringan dan waktu pengeringan biji kakao. Suhu dan kecepatan aliran udara memiliki hubungan negatif terhadap waktu pengeringan, yang berarti peningkatan suhu dan kecepatan udara akan mempercepat proses pengeringan. Sebaliknya, kelembapan relatif (RH) menunjukkan hubungan positif terhadap waktu pengeringan, di mana peningkatan RH menyebabkan waktu pengeringan menjadi lebih lama. Model regresi yang diperoleh dapat digunakan untuk memprediksi waktu pengeringan pada berbagai kombinasi kondisi operasional secara kuantitatif.

## 6. Evaluasi Akhir dan Optimalisasi Sistem

Berdasarkan keseluruhan hasil eksperimen, diperoleh konfigurasi sistem pengering yang paling optimal pada suhu 50–55°C, kecepatan aliran udara 2,0–2,5 m/s, dan kelembapan relatif 30–40%. Pada kondisi operasi tersebut, waktu pengeringan dapat dipersingkat hingga 20–24 jam dengan kualitas biji kakao yang paling baik, ditinjau dari keseragaman warna, kestabilan aroma fermentasi, serta tekstur akhir yang sesuai standar kadar air 6–8%. Selain itu, efisiensi termal sistem mencapai nilai tertinggi dan suhu ruang pengering tetap stabil meskipun terjadi fluktuasi radiasi matahari, berkat dukungan sistem kontrol dan heater tambahan.

Model matematis yang menggambarkan hubungan antara suhu, kecepatan aliran udara, dan kelembapan relatif terhadap waktu pengeringan dapat dikembangkan lebih lanjut sebagai dasar sistem pengendalian otomatis. Hal ini membuka peluang penerapan solar dryer aktif secara lebih luas pada skala petani maupun UMKM dengan sistem operasi yang lebih adaptif, efisien, dan berkelanjutan.

## KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa solar dryer aktif berbasis energi surya secara signifikan meningkatkan efisiensi dan mutu pengeringan biji kakao fermentasi dibandingkan penjemuran konvensional. Sistem dengan panel surya 200–300 Wp, heater 150 W, exhaust fan, dan kontrol otomatis mampu menghasilkan suhu stabil 45–60°C dan aliran udara 1,5–2,5 m/s.

Kondisi optimal diperoleh pada suhu 50–55°C, kecepatan udara 2,0–2,5 m/s, dan RH 30–40%, yang menghasilkan waktu pengeringan 20–24 jam dengan efisiensi termal 28–42%. Suhu dan kecepatan udara terbukti berpengaruh signifikan ( $p < 0,05$ ) terhadap waktu pengeringan. Mutu biji kakao lebih seragam, aroma fermentasi terjaga, kadar air akhir mencapai 6–8%, serta tingkat kontaminasi sangat rendah.

Teknologi ini efektif, efisien, dan berpotensi diterapkan pada skala petani dan UMKM. Pengembangan selanjutnya diarahkan pada peningkatan kapasitas, penyimpanan energi, dan integrasi sistem pemantauan berbasis IoT.

## DAFTAR RUJUKAN

- [1] H. Hermawan, R. Purnamayani, dan H. Andrianyta, “SAING Approach And Design To Develop A Cocoa Area Based On Innovation And Competitiveness,” vol. 5, no. 1, hal. 64–88, 2022.
- [2] M. Idrus, B. Sulham, S. Ammase, dan S. Sulfirani, “Strategi Pemasaran Kakao dalam Meningkatkan Pendapatan Petani ( Studi Petani di Kabupaten Kolaka Utara ),” vol. 1, no. x, 2024.
- [3] A. Rahmawati dan E. Hartulistiyoso, “Analisis Potensi dan Peluang Pengembangan Kakao Desa Sidomulyo , Kecamatan Lebakbarang , Kabupaten Pekalongan ( Analysis Of Potential And Development Opportunity Of Cocoa In Sidomulyo Village , Lebakbarang District , Pekalongan Regency ),” vol. 2, no. 3, hal. 330–337, 2020.
- [4] S. E. Aris, A. Jumiono, P. Magister, T. Pangan, S. Pascasarjana, dan U. Djuanda, “FAKTOR-FAKTOR PASCA PANEN,” vol. 2, hal. 73–78, 2020.
- [5] T. Paper, “Kajian Fermentasi dan Suhu Pengeringan pada Mutu Kakao ( Theobroma cacao L .),” hal. 129–135.
- [6] I. A. Saidi, *Pengeringan Sayuran Dan Buah -buahan*. 2019. doi: 10.21070/2019/978-602-5914-67-6.
- [7] P. S. Biologi dan U. Tanjungpura, “PERTUMBUHAN BIJI KAKAO ( Theobroma cacao L .) DENGAN VARIASI KONSENTRASI AIR KELAPA DAN LAMA WAKTU PERENDAMAN,” vol. 21, no. 2, hal. 73–80, 2021.
- [8] D. Tanggasari dan A. R. Jatnika, “Pengaruh Pengeringan Lapis Tipis Jagung ( Zea mays L ) sebagai Bahan Pakan dengan Suhu yang Berbeda Effect of Thin-Layer Drying of Corn ( Zea mays L ) as Feedstuff at Different Temperatures,” vol. 11, no. 1, hal. 73–81, 2023.
- [9] P. Laju, P. Jerami, dan N. Pada, “KONDISI PENGERINGAN VAKUM DAN ATMOSFERIK,” vol. 5, no. 1, 2018.
- [10] T. Pangan, F. Pertanian, dan U. Garut, “Review : Teknik Penanganan dan Penyimpanan Biji

- Kakao Terhadap Kadar Air , Suhu , Kelembaban dan Cemaran Jamur,” vol. 02, no. 01, 2024.
- [11] P. Kombinasi, “Jurnal Teknik Kimia USU,” vol. 08, no. 2, hal. 61–66, 2019.
- [12] M. Lisa, M. Lutfi, dan B. Susilo, “Pengaruh Suhu dan Lama Pengeringan terhadap Mutu Tepung Jamur Tiram Putih ( *Plaeotus ostreatus* ) Effect of Temperature Variation and Long Drying Of the Quality Flour White Oyster Mushroom ( *Plaeotus ostreatus* ),” vol. 3, no. 3, hal. 270–279, 2015.
- [13] B. S. Abdurrizal, N. A. Mufarida, dan E. Suharyanto, “A r m a t u r ;,” vol. 6, no. September, 2025.
- [14] E. Of *et al.*, “PENGARUH EMPAT ALAT PENGERING TERHADAP KADAR,” vol. 13, no. 1, hal. 71–80, 2017.
- [15] R. A. Suri, P. N. Lampung, R. Bangun, dan S. F. Dryer, “RANCANG BANGUN SOLAR FOOD DRYER SEBAGAI PENUNJANG DESIGN AND CONSTRUCTION OF A SOLAR FOOD DRYER TO SUPPORT PRACTICAL WORK FOR THE HORTICULTURAL PRODUCT PROCESSING,” vol. 6, no. 2, hal. 145–150.
- [16] A. S. Pongsapan dan R. Allo, “KARAKTERISTIK PENGERING SURYA ( SOLAR DRYER ) DENGAN TURBIN VENTILATOR,” vol. 03, no. 2, hal. 1–9, 2022.
- [17] I. Harianda dan M. A. Zaenuri, “RANCANG BANGUN PENGERING JAGUNG ENERGI,” vol. 12, no. 2, hal. 105–111, 2020.
- [18] R. Nurlaila, F. Safriwardy, dan N. Sylvia, “Pengembangan Perangkat Solar Dryer Untuk Pembuatan Asam Suntidi Dusun Madat Desa Paloh Lada Kecamatan Dewantara Aceh Utara,” vol. 5, no. 3, hal. 574–579, 2022.
- [19] J. Of, C. Development, dan D. Management, “Penerapan Teknologi Rekayasa Pengering Biji Kopi Menggunakan Lampu Sebagai Pemanas Pada Solar Dryer Dome,” vol. 7, no. 1, hal. 155–166, 2025, doi: 10.37680/jcd.v7i1.6726.
- [20] A. Anwari dan M. Syaefullah, “Rancang Bangun Alat Pengering Cabai Merah Menggunakan Sistem Rotary Dryer Berbasis Mikrokontroler,” vol. 3, no. 1, 2024.
- [21] A. Aziz, R. I. Mainil, L. R. Thermal, J. T. Mesin, F. Teknik, dan U. Riau, “KAJI EKSPERIMENTAL ALAT PENGERING TENAGA SURYA AKTIF PEMANASAN LANGSUNG ( DIRECT SOLAR DRYER ACTIVE ) BERBENTUK,” vol. 3, no. 2, hal. 1–4, 2016.