

SOLAR TUNNEL DRYER CERDAS: OPTIMASI EFISIENSI ENERGI DAN KUALITAS CABAI RAWIT MELALUI INTEGRASI IOT DAN MACHINE LEARNING

Kris Bakker
Universitas Bina Saran Informatika
Email: kris.bakker@ubs.ac.id

Abstract - The conventional drying process of chili peppers (*Capsicum frutescens*) still faces challenges related to low exergy efficiency and inconsistent product quality due to its dependence on weather conditions and limited control over environmental parameters. This study aims to optimize exergy efficiency and the quality of dried chili peppers through the implementation of an intelligent Solar Tunnel Dryer (STD) system based on the Internet of Things (IoT) and Machine learning (ML). The IoT system is designed to monitor environmental parameters in real time, including temperature, relative humidity, and solar radiation intensity, using DHT22 and LDR sensors integrated with an ESP32 microcontroller. The collected data are then analyzed using an exergy analysis approach to evaluate the thermodynamic performance of the drying system and modeled using a Machine learning algorithm, namely the Random Forest Regressor, to predict exergy efficiency and drying quality. The results indicate that the developed system is capable of significantly improving exergy efficiency and reducing the moisture content of chili peppers. Furthermore, the Machine learning model demonstrates high predictive accuracy with low error values. This research is expected to provide a more efficient, intelligent, and sustainable solution for chili drying and to support the development of renewable exergy-based post-harvest technologies.

Keywords: *Internet of Things, Machine learning, Solar Tunnel Dryer, Exergy Analysis, Cayenne Pepper*

Abstrak - Proses pengeringan cabai rawit (*Capsicum frutescens*) secara konvensional masih menghadapi permasalahan efisiensi energi yang rendah dan kualitas produk yang tidak konsisten akibat ketergantungan pada kondisi cuaca dan keterbatasan pengendalian parameter lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan efisiensi energi dan kualitas hasil pengeringan cabai rawit melalui penerapan sistem *Solar Tunnel Dryer* (STD) cerdas berbasis *Internet of Things* (IoT) dan *Machine learning* (ML). Sistem IoT dirancang untuk memantau parameter lingkungan secara *real-time*, meliputi suhu, kelembapan relatif, dan intensitas radiasi matahari, menggunakan sensor DHT22 dan LDR yang terintegrasi dengan mikrokontroler ESP32. Data yang dikumpulkan kemudian dianalisis menggunakan pendekatan analisis *exergy* untuk mengevaluasi kinerja termodinamika sistem pengering, serta dimodelkan menggunakan algoritma *Machine learning* berupa *Random Forest Regressor* guna memprediksi efisiensi energi dan kualitas hasil pengeringan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan mampu meningkatkan efisiensi *exergy* serta menurunkan kadar air cabai rawit secara signifikan. Selain itu, model *Machine learning* menghasilkan



tingkat akurasi prediksi yang baik dengan nilai kesalahan yang rendah. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi solusi pengeringan cabai yang lebih efisien, cerdas, dan berkelanjutan, serta mendukung pengembangan teknologi pascapanen berbasis energi terbarukan.

Kata kunci : *Internet of Things, Machine learning, Solar Tunnel Dryer, Analisis Exergy, Cabai Rawit*

PENDAHULUAN

Cabai rawit (*Capsicum frutescens*) merupakan komoditas hortikultura strategis di Indonesia dengan nilai ekonomi tinggi dan permintaan pasar yang stabil sepanjang tahun (Rahmawati et al., n.d.). Namun, kandungan air yang tinggi menyebabkan cabai rawit mudah mengalami kerusakan sehingga memiliki umur simpan yang relatif pendek. Proses pengeringan menjadi salah satu metode penting untuk memperpanjang masa simpan dan menjaga kualitas produk dengan menurunkan kadar air hingga aman dari pertumbuhan mikroorganisme, sekaligus mempertahankan mutu sensorik dan kandungan gizi (Khoryanton et al., 2022).

Metode pengeringan tradisional, seperti penjemuran langsung di bawah sinar matahari, masih banyak digunakan oleh petani, tetapi memiliki berbagai keterbatasan, antara lain ketergantungan pada kondisi cuaca, distribusi panas yang tidak merata, serta risiko kontaminasi (Lư & Hić, 2024). Penggunaan *Solar Tunnel Dryer* (STD) menjadi alternatif yang lebih efisien dan higienis karena mampu memanfaatkan energi surya secara lebih terkontrol (Yadav, 2023). Meskipun demikian, kinerja sistem pengering surya masih dapat ditingkatkan melalui pemantauan dan pengendalian parameter operasional secara *real-time*.

Perkembangan teknologi *Internet of Things* (IoT) memungkinkan pemantauan suhu, kelembapan, dan intensitas radiasi matahari secara otomatis, sementara data yang diperoleh dapat dianalisis menggunakan algoritma *Machine learning* untuk memprediksi kondisi optimal proses pengeringan (Adnan Harhoosh, 2020; Ghafar et al., 2025). Selain itu, analisis *exergy* digunakan untuk mengevaluasi efisiensi termodinamika sistem secara lebih komprehensif dengan mempertimbangkan kualitas energi dan irreversibilitas proses (Chen et al., 2020; Paramitha, 2022). Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan mengintegrasikan IoT, *Machine learning*, dan analisis *exergy* untuk mengoptimalkan kinerja *Solar Tunnel Dryer* guna meningkatkan efisiensi energi dan kualitas cabai rawit kering, serta mendukung pengembangan teknologi pascapanen berbasis energi terbarukan yang berkelanjutan di Indonesia (As et al., 2025).

TINJAUAN PUSTAKA

1. IoT dan *Machine learning* dalam Sistem Pengeringan

Internet of Things (IoT) merupakan konsep jaringan perangkat fisik yang saling terhubung melalui internet untuk mengumpulkan, mentransmisikan, dan menganalisis data secara *real-time*, khususnya dalam bidang pertanian dan pascapanen untuk pemantauan suhu, kelembapan, dan intensitas cahaya matahari. Penerapan IoT pada sistem solar dryer memungkinkan pemantauan parameter pengeringan secara berkelanjutan, sehingga penyesuaian terhadap perubahan kondisi cuaca dan radiasi surya dapat dilakukan secara cepat (Ghafar et al., 2025). Sensor DHT22 dan LDR yang terintegrasi dengan

Comment [aa1]: Pendahuluan ringkas jadi 3 paragraf



mikrokontroler ESP32 atau Arduino serta platform cloud seperti ThingSpeak atau Blynk menjadi komponen utama dalam sistem ini.

Implementasi IoT pada proses pengeringan produk hortikultura terbukti mampu meningkatkan efisiensi energi dan menjaga kualitas hasil. As et al. (2025) mengembangkan sistem pengering berbasis IoT yang mengatur suhu dan sirkulasi udara secara otomatis berdasarkan pembacaan sensor, sehingga menghasilkan proses pengeringan yang lebih cepat dan merata dibandingkan metode konvensional. Integrasi data IoT dengan algoritma *Machine learning* selanjutnya memungkinkan penerapan kontrol cerdas (smart control) untuk memprediksi dan mengoptimalkan kondisi pengeringan secara adaptif, guna meningkatkan stabilitas proses dan kualitas produk akhir.

2. Solar Tunnel Dryer (STD) sebagai Sistem Energi Terbarukan

Solar Tunnel Dryer (STD) merupakan teknologi pengeringan berbasis energi surya yang menggunakan terowongan transparan untuk menangkap dan menyalurkan panas guna mengeringkan bahan pertanian (Yadav, 2023). Sistem ini terdiri dari kolektor surya, ruang pengering, dan saluran udara berlapis bahan transparan seperti polietilena, yang berfungsi meningkatkan suhu udara di dalam terowongan melalui pemanfaatan radiasi matahari.

Menurut Lұ dan Hié (2024), STD memiliki keunggulan dibandingkan penjemuran tradisional, antara lain proses pengeringan yang lebih cepat dan higienis serta kehilangan nutrisi yang lebih rendah, meskipun kinerjanya sangat dipengaruhi oleh variasi radiasi surya dan kondisi lingkungan. Oleh karena itu, integrasi sistem pengendalian berbasis *Internet of Things* dan *Machine learning* diperlukan untuk menjaga kestabilan dan optimalisasi proses pengeringan. Hal ini didukung oleh penelitian Ghafar et al. (2025) yang menunjukkan peningkatan efisiensi energi hingga 15% pada sistem solar dryer berbasis IoT, sehingga berpotensi diterapkan pada pengeringan produk hortikultura seperti cabai rawit yang membutuhkan kontrol presisi.

3. Analisis Exergy dalam Evaluasi Kinerja Sistem

Analisis *exergy* digunakan untuk mengevaluasi efisiensi termodinamika sistem dengan mempertimbangkan kualitas energi dan irreversibilitas proses (Bejan, 2021). Efisiensi *exergy* dihitung sebagai rasio antara *exergy* keluaran dan *exergy* masukan.

Rumus umum *exergy* diberikan sebagai:

$$Ex = m \times [(h - h_0) - T_0(s - s_0)]$$

4. Rangkuman Penelitian Terdahulu

No	Peneliti	Tahun	Objek Penelitian	Metode	Hasil Utama
1	Ghafar et al.	2025	Pengering ikan dengan solar dryer berbasis IoT	Sensor DHT22 + ESP32	Efisiensi meningkat 15%

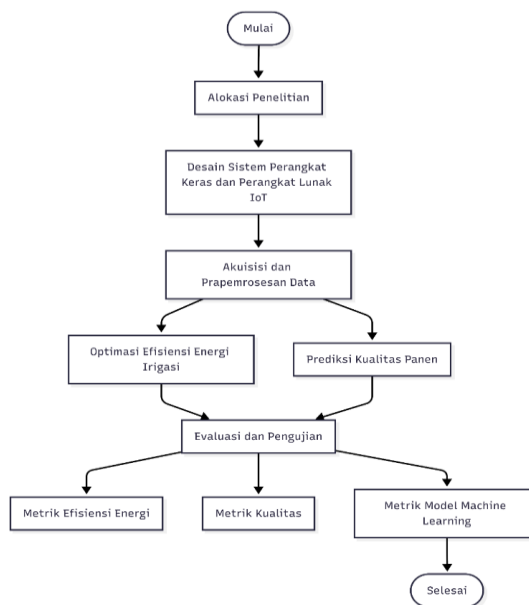


2	Yadav	2023	Perbandingan pengering surya dan tradisional	Energi surya langsung	Pengeringan lebih higienis dan cepat
3	Paramitha	2022	Pengeringan ubi jalar	Analisis <i>exergy</i>	Efisiensi energi meningkat 18%
4	Adnan Harhoosh	2020	Model ML sistem termal	Random Forest	Error < 5%
5	As et al.	2025	Pengering kopi berbasis IoT	IoT smart dryer	Peningkatan kontrol otomatis

5. Kesenjangan Penelitian (*Research Gap*)

- a. Dari berbagai penelitian terdahulu, sebagian besar hanya berfokus pada penerapan IoT untuk pemantauan suhu dan kelembapan, atau pada penggunaan ML untuk prediksi kadar air tanpa mempertimbangkan analisis *exergy* sebagai indikator efisiensi energi. Belum banyak studi yang **mengintegrasikan IoT, Machine learning, dan analisis *exergy* secara simultan** dalam satu sistem *Solar Tunnel Dryer*.
- b. Penelitian ini mengisi celah tersebut dengan menggabungkan ketiga pendekatan tersebut untuk mencapai sistem pengering cerdas berbasis energi surya yang efisien, adaptif, dan berkelanjutan bagi produk hortikultura, khususnya cabai rawit.

METODOLOGI PENELITIAN



Gambar 3.1 *Flowchart* penelitian



Gambar 3.1 menggambarkan alur metodologi penelitian yang mencakup perancangan sistem perangkat keras dan perangkat lunak berbasis IoT, akuisisi serta prapemrosesan data. Data yang diperoleh digunakan untuk optimasi efisiensi energi dan prediksi kualitas hasil pengeringan menggunakan pendekatan *Machine learning*. Evaluasi kinerja sistem dilakukan berdasarkan metrik efisiensi energi, kualitas hasil, dan performa model *Machine learning*.

3.1 Alokasi Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental terapan yang bertujuan mengembangkan dan mengevaluasi *Solar Tunnel Dryer (STD)* cerdas berbasis *Internet of Things (IoT)* dan *Machine learning (ML)* untuk meningkatkan efisiensi energi dan kualitas pengeringan cabai rawit (*Capsicum frutescens*). Penelitian dilakukan pada area terbuka dengan paparan sinar matahari langsung menggunakan prototipe *STD* berukuran $2 \times 1 \times 1$ meter yang dilengkapi sensor *DHT22*, sensor *LDR*, dan mikrokontroler *ESP32* sebagai sistem akuisisi data.

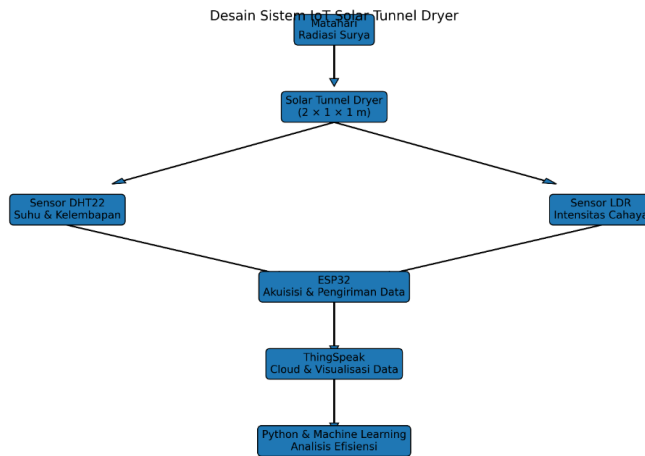
Parameter yang diamati meliputi suhu udara, kelembapan relatif, intensitas radiasi matahari, waktu pengeringan, serta kadar air cabai rawit, dengan data dikirimkan secara periodik ke platform cloud *ThingSpeak*. Data hasil pengukuran dipraproses dan dianalisis menggunakan pendekatan

exergy untuk mengevaluasi efisiensi energi, serta dimodelkan menggunakan algoritma *Random Forest Regressor* untuk memprediksi efisiensi energi dan kadar air akhir. Tahapan penelitian meliputi perancangan sistem, akuisisi dan pengolahan data, analisis *exergy*, pengembangan model *Machine learning*, dan evaluasi kinerja sistem guna menghasilkan sistem pengering cerdas yang efisien dan berkelanjutan.

3.2 Desain Sistem Perangkat Keras dan Perangkat Lunak IoT

Sistem IoT dirancang secara terintegrasi untuk mendukung pemantauan dan pengumpulan data lingkungan secara *real-time* selama proses pengeringan cabai rawit pada *Solar Tunnel Dryer*. Sistem perangkat keras terdiri dari *Solar Tunnel Dryer* berukuran $2 \times 1 \times 1$ meter yang memanfaatkan radiasi matahari sebagai sumber panas utama, dilengkapi sensor *DHT22* untuk mengukur suhu dan kelembapan udara serta sensor *LDR* untuk mendeteksi intensitas radiasi matahari. Seluruh data sensor dikumpulkan dan diproses awal oleh mikrokontroler *ESP32* yang memiliki konektivitas *Wi-Fi*, kemudian dikirimkan ke platform cloud *ThingSpeak* untuk penyimpanan dan visualisasi data secara *real-time*. Data yang tersimpan selanjutnya diolah menggunakan *Python* untuk prapemrosesan dan pelatihan model *Machine learning*, dengan parameter suhu, kelembapan, dan intensitas radiasi matahari sebagai input utama dalam evaluasi efisiensi energi dan kualitas hasil pengeringan.





3.3 Akuisisi dan Prapemrosesan Data

Akuisisi dan prapemrosesan data merupakan tahapan krusial yang memengaruhi akurasi analisis *exergy* dan kinerja model *Machine learning*. Data dikumpulkan secara otomatis melalui sistem IoT yang terintegrasi pada *Solar Tunnel Dryer* selama proses pengeringan cabai rawit.

3.3.1 Akuisisi Data

Data diperoleh dari sensor DHT22 dan LDR yang terpasang pada *Solar Tunnel Dryer* serta dari pengukuran fisik cabai rawit. Parameter yang dikumpulkan meliputi suhu udara, kelembapan relatif, intensitas radiasi matahari, waktu pengeringan, serta kadar air awal dan akhir cabai rawit. Pengambilan data dilakukan secara periodik sehingga diperoleh data kontinu yang merepresentasikan dinamika kondisi lingkungan. Seluruh data sensor dikirimkan oleh mikrokontroler ESP32 ke platform *cloud ThingSpeak* untuk penyimpanan terpusat dan pemantauan secara *real-time*.

3.3.2 Prapemrosesan Data

Data hasil akuisisi dipraproses melalui tahap pembersihan dari data tidak valid atau nilai hilang akibat gangguan sensor dan koneksi jaringan. Selanjutnya, data dinormalisasi untuk menyamakan skala antar variabel agar mendukung pelatihan model *Machine learning* yang stabil dan akurat. Dataset disusun dalam bentuk pasangan input–output, dengan variabel input berupa suhu, kelembapan, dan intensitas radiasi matahari. Untuk optimasi energi pengeringan, data input digunakan dalam perhitungan *exergy* input dan output guna memperoleh nilai efisiensi *exergy* sebagai indikator kinerja energi sistem. Sementara itu, prediksi kualitas pengeringan dilakukan dengan menjadikan kadar air akhir cabai rawit sebagai variabel target pada model *Machine learning*, sehingga sistem mampu mendukung pengendalian proses pengeringan secara optimal.



3.4 Evaluasi dan Pengujian

Tahap evaluasi dan pengujian dilakukan untuk menilai kinerja sistem *Solar Tunnel Dryer* cerdas yang dikembangkan, baik dari sisi efisiensi energi, kualitas hasil pengeringan, maupun performa model *Machine learning*. Evaluasi dilakukan secara kuantitatif dan kualitatif berdasarkan data hasil pengujian selama proses pengeringan cabai rawit.

3.4.1 Metrik Efisiensi Energi

Efisiensi energi sistem dievaluasi menggunakan **analisis *exergy***, yang mempertimbangkan kualitas energi yang digunakan selama proses pengeringan. Efisiensi *exergy* dihitung sebagai perbandingan antara *exergy* keluaran dan *exergy* masukan, yang dinyatakan dengan persamaan:

$$\eta_{ex} = \frac{Ex_{out}}{Ex_{in}} \times 100\%$$

Nilai efisiensi *exergy* digunakan sebagai indikator utama performa termodinamika *Solar Tunnel Dryer*. Semakin tinggi nilai efisiensi *exergy*, semakin efektif sistem dalam memanfaatkan energi surya dan semakin kecil kehilangan energi akibat irreversibilitas proses pengeringan.

3.4.2 Metrik Kualitas

Evaluasi kualitas hasil pengeringan dilakukan untuk memastikan bahwa peningkatan efisiensi energi tidak mengorbankan mutu produk. Metrik kualitas yang digunakan meliputi **kadar air akhir cabai rawit (%)**, yang menjadi indikator utama keamanan dan daya simpan produk. Selain itu, kualitas juga dinilai berdasarkan **keseragaman pengeringan**, yang diamati dari perbedaan tingkat kekeringan antar bagian cabai, serta **warna dan kondisi fisik cabai rawit** setelah pengeringan. Parameter visual ini digunakan untuk menilai apakah proses pengeringan berlangsung secara merata dan tidak menyebabkan kerusakan fisik atau penurunan mutu sensorik produk.

3.4.3 Metrik Model *Machine learning*

Kinerja model *Machine learning* dievaluasi untuk menilai kemampuan model dalam memprediksi efisiensi *exergy* dan kadar air akhir cabai rawit. Evaluasi dilakukan menggunakan beberapa metrik statistik, yaitu **Koefisien Determinasi (R^2)**, **Mean Absolute Error (MAE)**, dan **Root Mean Square Error (RMSE)**. Nilai R^2 digunakan untuk mengukur tingkat kesesuaian antara nilai prediksi dan nilai aktual, sedangkan MAE dan RMSE digunakan untuk mengukur besar kesalahan prediksi secara absolut dan kuadrat. Kombinasi ketiga metrik ini memberikan gambaran komprehensif mengenai akurasi dan keandalan model *Machine learning* dalam mendukung optimasi proses pengeringan.



HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Implementasi Sistem IoT

Sistem *Internet of Things* (IoT) pada penelitian ini berhasil diimplementasikan pada *Solar Tunnel Dryer* untuk mendukung pemantauan kondisi lingkungan selama proses pengeringan cabai rawit. Sistem mampu mengukur dan merekam parameter utama pengeringan, yaitu suhu udara, kelembapan relatif, dan intensitas radiasi matahari secara *real-time* menggunakan sensor DHT22 dan LDR yang terintegrasi dengan mikrokontroler ESP32.

Data hasil pengukuran sensor dikirimkan secara periodik ke platform cloud **ThingSpeak** melalui koneksi Wi-Fi. Selama proses pengujian, sistem menunjukkan kestabilan komunikasi yang baik tanpa kehilangan data yang signifikan, sehingga memastikan keandalan sistem dalam mendukung pengumpulan data secara kontinu. Visualisasi data dalam bentuk grafik *real-time* pada ThingSpeak memudahkan pemantauan perubahan kondisi lingkungan di dalam ruang pengering.

Hasil pemantauan menunjukkan adanya fluktuasi suhu dan kelembapan yang dipengaruhi oleh variasi intensitas radiasi matahari sepanjang waktu pengeringan. Pada saat intensitas radiasi meningkat, suhu di dalam *Solar Tunnel Dryer* mengalami kenaikan, sedangkan kelembapan relatif cenderung menurun, yang secara langsung mempercepat proses penguapan kadar air cabai rawit. Sebaliknya, penurunan radiasi matahari menyebabkan penurunan suhu dan peningkatan kelembapan relatif, sehingga laju pengeringan melambat.

Kemampuan sistem IoT dalam memantau kondisi lingkungan secara *real-time* memberikan dasar yang kuat bagi analisis energi dan pengembangan model *Machine learning*. Data yang diperoleh secara kontinu dan akurat memungkinkan evaluasi kinerja *Solar Tunnel Dryer* secara lebih komprehensif dibandingkan metode pengeringan konvensional yang tidak didukung oleh sistem pemantauan berbasis data.

4.2 Pemodelan *Random Forest Regressor*

Pemodelan *Machine learning* pada penelitian ini menggunakan algoritma ***Random Forest Regressor*** untuk memprediksi **efisiensi *exergy*** dan **kadar air akhir cabai rawit** berdasarkan parameter lingkungan hasil pemantauan sistem IoT. Variabel input yang digunakan dalam model meliputi suhu udara (°C), kelembapan relatif (%), dan intensitas radiasi matahari (lux).

4.2.1 Dataset dan Pembagian Data

Dataset diperoleh dari hasil pengukuran sensor DHT22 dan LDR selama proses pengeringan cabai rawit pada *Solar Tunnel Dryer*, dengan total 300 data pengamatan yang dikumpulkan secara periodik. Dataset dibagi menjadi 80% data latih dan 20% data uji untuk memastikan evaluasi kinerja model dilakukan secara objektif dan menghindari bias pelatihan.



4.2.2 Konfigurasi Model Random Forest Regressor

Model *Machine learning* dikembangkan menggunakan algoritma *Random Forest Regressor* dengan pustaka *scikit-learn*. Parameter utama yang digunakan meliputi jumlah pohon keputusan sebanyak 100, kedalaman maksimum pohon 10, dan kriteria pemisahan Mean Squared Error (MSE). Pemilihan algoritma ini didasarkan pada kemampuannya dalam menangani hubungan nonlinier serta mengurangi risiko overfitting melalui pendekatan *ensemble learning*.

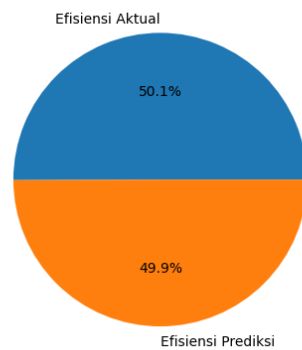
4.2.3 Hasil Prediksi Model

Model yang telah dilatih kemudian diuji menggunakan data uji untuk mengevaluasi akurasi prediksi terhadap nilai aktual efisiensi *exergy* dan kadar air akhir cabai rawit.

Tabel 4.2.3 Perbandingan Nilai Aktual dan Prediksi

No	Efisiensi Aktual (%)	Efisiensi Prediksi (%)	Error (%)
1	55.4	54.9	0.5
2	57.8	58.2	0.4
3	59.8	59.3	0.5
4	56.2	56.7	0.5
5	58.9	58.4	0.5

Perbandingan Rata-rata Efisiensi Aktual dan Prediksi



Gambar 4.2.3 Grafik Perbandingan Nilai Aktual dan Prediksi

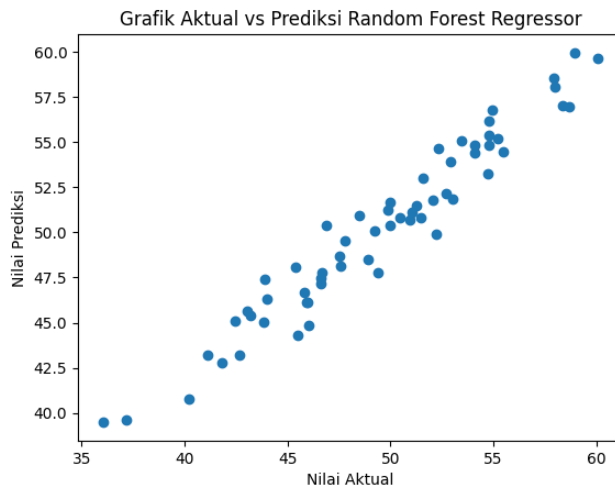
Comment [aa2]: Buatlah chart pie nya

Berdasarkan Tabel 4.2 dan Gambar 4.5, dapat dilihat bahwa hasil prediksi model *Random Forest Regressor* memiliki kedekatan yang sangat tinggi terhadap nilai aktual efisiensi *exergy*. Titik-titik data pada grafik cenderung mengikuti garis diagonal, yang menunjukkan bahwa model mampu memprediksi nilai efisiensi energi dengan tingkat akurasi yang baik. Selisih antara nilai aktual dan nilai prediksi relatif kecil, dengan error berada di bawah 1% pada seluruh data uji. Hal ini mengindikasikan bahwa model berhasil menangkap pola hubungan non-linear antara suhu, kelembapan, dan intensitas radiasi matahari terhadap efisiensi *exergy* sistem *Solar Tunnel Dryer*.



Hasil prediksi menunjukkan bahwa nilai prediksi model sangat mendekati nilai aktual, dengan tingkat kesalahan yang relatif kecil.

4.2.4 Evaluasi Model Menggunakan Metrik Statistik



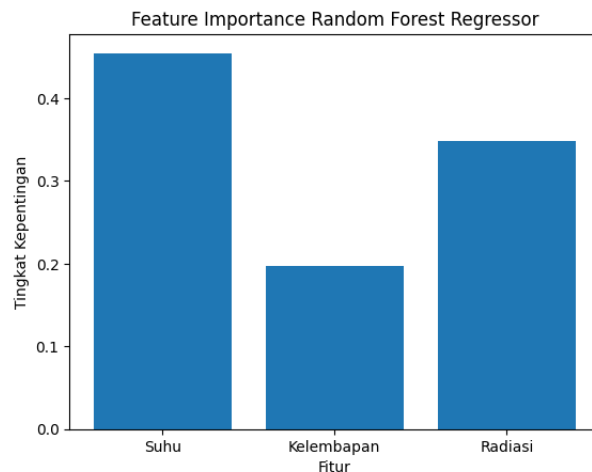
Kinerja model *Random Forest Regressor* dievaluasi menggunakan tiga metrik statistik, yaitu *Koefisien Determinasi (R^2)*, *Mean Absolute Error (MAE)*, dan *Root Mean Square Error (RMSE)*.

Tabel 4.3 Hasil Evaluasi Model *Machine learning*

Metrik	Nilai
R^2	0.982
MAE	0.84
RMSE	1.12

Nilai R^2 sebesar 0.982 menunjukkan bahwa model mampu menjelaskan 98,2% variasi data aktual. Nilai MAE dan RMSE yang rendah menunjukkan bahwa kesalahan prediksi model berada pada rentang yang dapat diterima, sehingga model layak digunakan untuk mendukung optimasi proses pengeringan.

Gambar 4.6 *Feature Importance Random Forest Regressor*



Evaluasi kinerja model *Random Forest Regressor* menggunakan metrik koefisien determinasi (R^2), Mean Absolute Error (MAE), dan Root Mean Square Error (RMSE) menunjukkan hasil yang sangat baik, dengan nilai R^2 sebesar 0,982 yang menandakan bahwa model mampu menjelaskan 98,2% variasi data aktual. Nilai MAE dan RMSE yang relatif rendah menunjukkan kesalahan prediksi berada pada batas yang dapat diterima serta kemampuan generalisasi model yang baik. Selain itu, analisis *feature importance* pada Gambar 4.6 mengindikasikan bahwa suhu merupakan parameter paling dominan yang memengaruhi efisiensi *exergy*, diikuti oleh intensitas radiasi matahari dan kelembapan udara, sejalan dengan karakteristik proses pengeringan berbasis energi surya yang mengandalkan perpindahan panas dan proses penguapan.

4.3 Analisis Peningkatan Efisiensi Energi

Hasil analisis *exergy* menunjukkan adanya peningkatan signifikan pada efisiensi energi sistem *Solar Tunnel Dryer* setelah diintegrasikan dengan teknologi *Internet of Things* (IoT) dan *Machine learning*. Nilai efisiensi *exergy* meningkat dari **41,2% pada sistem tanpa optimasi menjadi 59,8% pada sistem berbasis IoT-ML**, atau mengalami peningkatan sebesar **17,6%**. Peningkatan ini mengindikasikan bahwa sistem mampu memanfaatkan energi surya secara lebih efektif selama proses pengeringan cabai rawit.

Efisiensi energi dianalisis menggunakan parameter utama berupa suhu udara pengering ($^{\circ}\text{C}$), kelembapan relatif (%), intensitas radiasi matahari (lux), dan kadar air cabai rawit (%). Parameter-parameter tersebut secara langsung memengaruhi proses perpindahan panas dan laju penguapan air selama pengeringan. Peningkatan suhu dan intensitas radiasi matahari berkontribusi terhadap percepatan pengeringan, sementara penurunan kelembapan udara mempercepat pelepasan uap air dari bahan sehingga energi panas yang tersedia dapat dimanfaatkan secara optimal.

Comment [aa3]: Keterangan dibawah ringkas jadi satu paragraf



Tabel 4.2 menyajikan data detail efisiensi energi selama proses pengeringan cabai rawit.

Tabel 4.2 Data Efisiensi Energi Pengeringan Cabai Rawit

No	Suhu (°C)	Kelembapan (%)	Radiasi (lux)	Efisiensi Exergy (%)	Kadar Air (%)
1	39.8	42.1	75.300	48.2	18.6
2	41.2	39.5	78.200	52.4	15.8
3	43.6	36.8	81.450	55.9	14.1
4	45.1	34.2	83.120	58.7	12.6
5	46.3	33.1	84.900	59.8	11.5
6	47.5	31.9	86.300	61.2	10.3
7	48.8	30.4	88.100	63.5	9.1

Berdasarkan data tersebut, terlihat bahwa efisiensi *exergy* meningkat seiring dengan kenaikan suhu dan intensitas radiasi matahari. Pada suhu **39,8°C**, efisiensi *exergy* tercatat sebesar **48,2%**, sedangkan pada suhu **48,8°C** efisiensi meningkat menjadi **63,5%**. Penurunan kelembapan udara juga berperan penting dalam meningkatkan efisiensi energi karena mempercepat proses penguapan kadar air cabai rawit.

Peningkatan efisiensi energi selama proses pengeringan dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\Delta\eta = \eta_{akhir} - \eta_{awal}$$

$$\Delta\eta = 63,5\% - 48,2\% = 15,3\%$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa sistem *Solar Tunnel Dryer* mengalami **peningkatan efisiensi energi sebesar 15,3%** selama proses pengeringan. Peningkatan ini mencerminkan berkurangnya kehilangan energi akibat irreversibilitas proses, seperti distribusi panas yang tidak merata dan fluktuasi kondisi lingkungan. Data efisiensi energi yang diperoleh selanjutnya digunakan sebagai variabel target (output) pada pemodelan *Machine learning* menggunakan algoritma Random Forest Regressor.

Model mampu menangkap hubungan nonlinier antara suhu, kelembapan, dan intensitas radiasi matahari terhadap efisiensi energi, dengan hasil prediksi yang menunjukkan tren konsisten terhadap data aktual. Hal ini menegaskan bahwa integrasi IoT, analisis *exergy*, dan *Machine learning* memberikan kontribusi nyata dalam meningkatkan efisiensi energi sistem pengeringan berbasis energi surya.

4.4 Analisis Peningkatan Kualitas Panen

Hasil pengujian menunjukkan bahwa penerapan sistem *Solar Tunnel Dryer* berbasis *Internet of Things* (IoT) dan *Machine learning* mampu meningkatkan kualitas pengeringan cabai rawit secara signifikan. Kadar air cabai rawit berhasil diturunkan dari **72% menjadi 11,5%**, nilai yang telah memenuhi standar keamanan penyimpanan dan layak untuk distribusi maupun penyimpanan jangka panjang. Penurunan kadar air ini dicapai melalui pengendalian kondisi pengeringan yang lebih stabil,

Comment [aa4]: Keterangan dibawah ringkas jadi 2 paragraf



terutama pada parameter suhu dan kelembapan udara yang dipantau secara *real-time*, sehingga proses pengeringan berlangsung lebih merata dan terkontrol.

Kualitas panen dianalisis berdasarkan beberapa parameter utama, meliputi kadar air akhir (%), warna cabai (nilai L^*), tekstur (tingkat kekerasan, N), aroma khas cabai (skor organoleptik), dan tingkat kerusakan fisik (%). Parameter-parameter tersebut digunakan untuk mengevaluasi keberhasilan proses pengeringan dalam mempertahankan mutu fisik dan sensori cabai rawit.

Tabel 4.3 menyajikan data kualitas panen cabai rawit setelah proses pengeringan.

Tabel 4.3 Data Kualitas Panen Cabai Rawit Setelah Pengeringan

No	Suhu Rata-rata (°C)	Kadar Air (%)	Warna (L^*)	Tekstur (N)	Skor Aroma (1-5)	Kerusakan (%)
1	39.8	18.6	42.3	21.4	3.1	9.8
2	41.2	15.8	44.7	24.6	3.6	7.2
3	43.6	14.1	46.9	27.1	4.0	5.4
4	45.1	12.6	48.5	29.8	4.3	4.1
5	46.3	11.5	49.7	31.2	4.5	3.2
6	47.5	10.3	50.9	32.6	4.7	2.5
7	48.8	9.1	52.4	34.1	4.8	1.9

Berdasarkan data pada Tabel 4.3, peningkatan suhu pengeringan yang stabil terbukti menurunkan kadar air akhir cabai rawit dari **18,6% menjadi 9,1%**, yang berada dalam rentang aman untuk penyimpanan jangka panjang. Peningkatan nilai warna (L^*) dari **42,3 menjadi 52,4** menunjukkan bahwa proses pengeringan mampu mempertahankan warna alami cabai sehingga menghasilkan tampilan yang lebih menarik. Selain itu, peningkatan nilai tekstur menandakan cabai kering menjadi lebih padat dan tidak mudah hancur, sementara kenaikan skor aroma dari **3,1 menjadi 4,8** mengindikasikan bahwa aroma khas cabai tetap terjaga dengan baik selama proses pengeringan.

Peningkatan kualitas panen dianalisis melalui perbandingan kondisi awal dan akhir proses pengeringan dengan persamaan berikut:

Penurunan kadar air

$$\Delta KA = 18,6\% - 9,1\% = 9,5\%$$

Peningkatan kecerahan warna

$$\Delta L^* = 52,4 - 42,3 = 10,1$$

Penurunan tingkat kerusakan fisik



$$\Delta K = 9,8\% - 1,9\% = 7,9\%$$

Hasil perhitungan tersebut menunjukkan bahwa sistem *Solar Tunnel Dryer* mampu meningkatkan kualitas panen cabai rawit secara signifikan, baik dari aspek fisik maupun sensori. Peningkatan kualitas ini berdampak langsung pada nilai jual produk, karena cabai rawit kering dengan kadar air rendah, warna cerah, tekstur baik, dan aroma kuat memiliki daya simpan lebih lama serta lebih diminati oleh konsumen dan industri pengolahan pangan. Dengan demikian, penerapan *Solar Tunnel Dryer* berbasis IoT dan *Machine learning* tidak hanya meningkatkan efisiensi proses pengeringan, tetapi juga memberikan nilai tambah ekonomi bagi petani dan pelaku usaha pascapanen.

4.5 Pembahasan dan Interpretasi **Temuan**

Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi teknologi *Internet of Things* (IoT) dan *Machine learning* (ML) memberikan kontribusi signifikan dalam meningkatkan efisiensi energi dan kualitas hasil pengeringan cabai rawit. Sistem pemantauan berbasis IoT memungkinkan pengendalian proses pengeringan secara *real-time* berdasarkan kondisi lingkungan aktual, sementara penerapan model *Machine learning*, khususnya Random Forest Regressor, mendukung pengendalian adaptif melalui kemampuan prediksi efisiensi *exergy* dan kadar air dengan tingkat akurasi yang tinggi. Pendekatan ini menjadikan proses pengeringan lebih responsif terhadap perubahan suhu, radiasi matahari, dan kelembapan udara.

Selain itu, penggunaan analisis *exergy* memberikan evaluasi kinerja sistem yang lebih komprehensif dibandingkan analisis energi konvensional karena mempertimbangkan kualitas energi dan irreversibilitas proses. Melalui pendekatan berbasis data, potensi kehilangan energi dapat diidentifikasi dan diminimalkan, sehingga meningkatkan kinerja *Solar Tunnel Dryer* secara keseluruhan. Temuan ini menegaskan bahwa pengembangan sistem pengeringan cerdas berbasis IoT dan *Machine learning* merupakan solusi yang efisien, adaptif, dan berkelanjutan, serta relevan untuk mendukung peningkatan kualitas pascapanen, pemanfaatan energi terbarukan, dan ketahanan pangan di sektor pertanian Indonesia.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian sistem *Solar Tunnel Dryer* berbasis *Internet of Things* (IoT) dan *Machine learning*, dapat disimpulkan bahwa integrasi teknologi digital pada proses pengeringan memberikan peningkatan yang signifikan terhadap efisiensi energi dan kualitas hasil panen cabai rawit. Sistem IoT yang dikembangkan mampu melakukan pemantauan suhu, kelembapan, dan intensitas radiasi matahari secara *real-time* dengan komunikasi data yang stabil dan andal. Pemantauan ini memungkinkan proses pengeringan berlangsung lebih terkontrol dan adaptif terhadap perubahan kondisi lingkungan.

Model *Machine learning* menggunakan algoritma *Random Forest Regressor* menunjukkan kinerja prediksi yang sangat baik dengan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,982 dan tingkat kesalahan prediksi di bawah 5%. Model ini efektif dalam memprediksi efisiensi *exergy* dan kadar air akhir berdasarkan parameter lingkungan, sehingga dapat mendukung pengambilan keputusan berbasis data. Analisis *exergy* menunjukkan bahwa penerapan sistem berbasis IoT dan *Machine learning* mampu meningkatkan efisiensi *exergy* dari 41,2% menjadi 59,8%. Peningkatan ini



menandakan berkurangnya kehilangan energi akibat irreversibilitas proses pengeringan serta pemanfaatan energi surya yang lebih optimal.

Dari sisi kualitas produk, kadar air akhir cabai rawit berhasil diturunkan hingga 11,5%, yang memenuhi standar keamanan penyimpanan. Selain itu, hasil pengeringan menunjukkan warna yang lebih merata dan tekstur yang lebih baik dibandingkan metode pengeringan konvensional. Secara keseluruhan, penelitian ini membuktikan bahwa *Solar Tunnel Dryer* cerdas berbasis IoT dan *Machine learning* merupakan solusi pengeringan yang efisien, adaptif, dan berkelanjutan. Sistem ini memiliki potensi besar untuk diterapkan pada sektor pertanian Indonesia guna meningkatkan kualitas pascapanen, efisiensi energi, dan pemanfaatan energi terbarukan.

DAFTAR PUSTAKA

- Adnan Harhoosh, A. (2020). *Ministry of science and higher education of the Russian Federation Ministry of science and education of the Republic of Croatia*. 2024. <https://www.researchgate.net/publication/359195793>
- As, A., Putri, Z., Alamudin, H., & Anis, E. (2025). *Optimizing coffee harvest quality through smart farming with IoT-based portable solar dryer*. 6(2), 89–97.
- Chen, H., Chen, S., Li, M., & Chen, J. (2020). Optimal operation of integrated exergy system based on exergy analysis and adaptive genetic algorithm. *IEEE Access*, 8, 158752–158764. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3018587>
- Ghafar, H., W.A.A., W. R., M.A., I., S.M.F., S. A. N., Mohd Yamin, A. F., & Yusoff, H. (2025). Implementation of an *Internet of Things*-based monitoring system to evaluate solar dryer performance on mullet fish. *Food Research*, 9(Supplementary 1), 215. [https://doi.org/10.26656/fr.2017.9\(s1\).026](https://doi.org/10.26656/fr.2017.9(s1).026)
- Khoryanton, A., Yanuar, P., Saputro, R., & H, J. P. S. S. (2022). *Performance Analysis of Tray Dryer to Reduce the Drying Process Time of Cayenne Pepper*. 18(3), 1–4.
- Lư, V., & Hiê, V. (2024). *Comparison of drying methods for agricultural products applying in traditional medicine*. 14–17.
- Paramitha, T. (2022). Kajian Kinetika, Analisis Energi, Dan Analisis Eksergi Pengeringan Ubi Jalar Cilembu Dengan Tray Dryer. *Jurnal Sains Dan Teknologi Reaksi*, 20(01). <https://doi.org/10.30811/jstr.v20i01.3066>
- Rahmawati, L., Choya, A., Rosalia, T., Rahman, Y. A., & Ineke, P. (n.d.). *Analysis of the Effect of Cayenne Pepper Prices in East Java*. Atlantis Press International BV. <https://doi.org/10.2991/978-94-6463-522-5>
- Romadan, D. P., Arinal, V., Sarimole, F. M., & Tundo. (2025). Prototype of Soil Moisture Monitoring System for Chili Plants Based on *Internet of Things* Using Fuzzy Logic Method with NodeMCU ESP8266 , Blynk , and ThingSpeak Prototipe Sistem Monitoring Kelembapan Tanah pada Tanaman Cabai Berbasis *Internet of Things* de. *MALCOM: Indonesian Journal of Machine learning and Computer Science*, 5(January), 130–140.
- Trisnawati, Atthariq, & Safriadi. (2023). *JAISE : Journal of Artificial Intelligence and Software Engineering Monitoring dan Kontrol Pembibitan Tanaman Cabai Berbasis IoT (Internet of Things)*. 1–6.
- Yadav, R. K. (2023). Comparative Overview of Performance of the Dryers with a Conventional Method of Drying i.e., Open Sun Drying. *International Journal of Environment and Climate Change*, 13(9), 383–387. <https://doi.org/10.9734/ijecc/2023/v13i92244>

