

Artikel Teknik mesin

Performa Pengeringan Terubuk pada PVT Solar Dryer Menggunakan Panel Surya Monofacial dengan Absorber sebagai Sumber Energi

Achmad Azis Rahmanto^{*}, Jojo Sumarjo, Ujiburrahman

Fakultas Teknik, Teknik Mesin, Universitas Singaperbangsa Karawang, Karawang, Indonesia

INFORMASI ARTIKEL

Diterima Redaksi: 19 Juli 2025
Revisi Akhir: 19 Oktober 2025
Diterbitkan Online: 31 Oktober 2025

KATA KUNCI

PVT Dryer
IoT
Terubuk
Energi Surya
Efisiensi Pengeringan

KORESPONDENSI

Phone: +62 812-9818-0982
E-mail: azizahmadelskm@gmail.com

A B S T R A K

Penelitian ini mengkaji performa sistem pengeringan berbasis Photovoltaic Thermal (PVT) Dryer yang terintegrasi dengan teknologi Internet of Things (IoT) untuk mengeringkan tanaman terubuk (*Saccharum edule*). Sistem ini memanfaatkan panel surya monofacial sebagai sumber energi utama untuk menghasilkan panas dan listrik secara simultan, serta dilengkapi sensor untuk memantau suhu dan kelembapan secara real-time. Pengujian dilakukan selama tiga hari, dan parameter yang diamati meliputi massa air yang diuapkan, efisiensi energi, serta waktu pengeringan. Hasil menunjukkan bahwa massa air yang diuapkan mencapai 0,349–0,370 kg per 1 kg bahan basah dengan efisiensi energi pengeringan tertinggi sebesar 32,78%. Efisiensi termal kolektor mencapai 90,74%, sementara nilai Specific Moisture Extraction Rate (SMER) tertinggi tercatat 0,488 kg/kWh dan Specific Energy Consumption (SEC) terendah sebesar 7,38 MJ/kg. Sistem PVT juga terbukti mampu menghemat waktu pengeringan hingga 50% dibanding metode terbuka. Dengan hasil tersebut, sistem PVT Dryer berbasis IoT terbukti efisien dan berpotensi menjadi solusi pengeringan alternatif yang ramah lingkungan dan hemat energi untuk komoditas pertanian tropis.

PENDAHULUAN

Kecamatan Tegalwaru di Kabupaten Karawang, Jawa Barat, memiliki potensi pertanian yang besar dengan topografi yang mendukung budidaya berbagai jenis tanaman, termasuk tanaman terubuk (*Saccharum edule*) [1]. Tanaman ini mengandung nutrisi seperti vitamin C, kalsium, dan fosfor yang tinggi dan biasanya dikonsumsi bagian bunganya sebagai sayuran [1]. Namun, potensi ekonomis dan gizi dari bagian lain seperti batang masih kurang dimanfaatkan secara optimal.

Salah satu kendala utama dalam pemanfaatan tanaman terubuk secara maksimal adalah proses pengeringan yang masih dilakukan dengan cara konvensional, yaitu dijemur langsung di bawah sinar matahari [1]. Metode ini bergantung pada intensitas cahaya matahari, sangat dipengaruhi oleh kondisi cuaca, dan memiliki risiko kontaminasi dari debu serta kotoran. Selain itu, proses pengeringan secara tradisional tidak mampu mengontrol suhu dan kelembapan sehingga hasil produk menjadi kurang konsisten.

Sebagai solusi atas permasalahan tersebut, teknologi pengering berbasis energi terbarukan dengan sistem Photovoltaic Thermal (PVT) Dryer dikembangkan dalam penelitian ini. Sistem PVT Dryer memungkinkan konversi energi surya menjadi energi listrik dan panas secara bersamaan [2]. Untuk meningkatkan efisiensi dan keandalan, sistem pengering ini dilengkapi dengan teknologi Internet of Things (IoT) yang memungkinkan pemantauan suhu dan kelembapan secara real-time menggunakan sensor serta pengontrol berbasis mikrokontroler [3].

TINJAUAN PUSTAKA

Pengeringan

Pengeringan adalah suatu cara untuk mengeluarkan atau menghilangkan sebagian besar air dari bahan dengan menggunakan energi panas. Pengeluaran air dari bahan dilakukan sampai kadar air keseimbangan dengan lingkungan tertentu dimana jamur, enzim, mikroorganisme, dan serangga yang dapat merusak menjadi tidak aktif [4].

Pengeringan hasil pertanian dimaksudkan untuk mengurangi kadar air yang terkandung dalam bahan hasil pertanian yang dikeringkan hingga mencapai tinggal 10% sampai 12% saja, dengan hasil pengeringan seperti ini biji-bijian hasil pertanian tidak mudah diserang mikro organisme pembusuk. [5]

PVT Dryer

PVT Dryer adalah teknologi yang memanfaatkan kombinasi panel fotovoltaik (PV) dan sistem pemanas termal untuk mengoptimalkan penggunaan energi matahari. Teknologi ini bekerja dengan memanfaatkan sinar matahari untuk menghasilkan listrik sekaligus memanfaatkan panas yang dihasilkan untuk proses pengeringan. Dalam konteks pengeringan hasil pertanian, PVT dryer memungkinkan penggunaan energi yang lebih efisien, terutama di daerah yang kaya sinar matahari.

Menurut penelitian yang dilakukan PVT dryer dapat meningkatkan efisiensi energi hingga 20% dibandingkan sistem pengeringan konvensional. Selain itu, PVT dryer juga berperan dalam mengurangi emisi gas rumah kaca karena memanfaatkan sumber energi terbarukan.[2] Panel monofacial yang digunakan menyerap sinar matahari dari satu sisi, sementara sistem termal mengalirkan udara panas ke ruang pengering. Sistem ini meningkatkan efisiensi hingga 20–30% dibandingkan metode tradisional.

Internet of Things (IoT)

Teknologi IoT cocok sekali untuk digunakan di bidang pertanian karena fungsinya yang memungkinkan untuk mengatasi semua masalah yang dihadapi petani secara elektronik. Sensor IoT memiliki kemampuan untuk memantau penyakit pada tanaman dan aktivitas hama serta kesuburan tanah. Selain itu, ada teknologi nirkabel yang digunakan saat ini untuk dapat memantau cuaca dan juga iklim. Kemudian, peralatan berteknologi IoT dapat menjadwalkan otomatisasi pemupukan, penyemprotan pestisida, dan penyiraman.[3]

Massa Air yang diuapkan

Massa air yang diuapkan m_{ag} dapat dihitung menggunakan rumus [6]:

$$W = m_0 \frac{M_i - M_f}{100} \quad (1)$$

m_0 = massa awal bahan (kg)
 M_i = kadar air awal (% wet basis)
 m_f = kadar air akhir (% wet basis)

Kebutuhan Energi dalam Pengeringan

Untuk menganalisis energi panas yang diperlukan pada proses pengeringan terubuk, perlu diketahui energi yang dibutuhkan untuk menguapkan air yang terkandung di dalamnya. Persamaan untuk energi total dapat ditulis sebagai [7]:

$$q_{out} = W \cdot L \quad (2)$$

Di sini, q_{out} merupakan total energi panas yang dibutuhkan untuk mengeringkan terubuk (dalam Joule)

q_{out} = Total energi panas yang dibutuhkan untuk pengeringan (Joule)
 W = Massa air yang diuapkan dari bahan (kg)
 L = Panas laten penguapan air (J/kg) $2.418 \times 10^6 J/kg$ (pada $\pm 35-40^\circ C$)

Energi yang disalurkan

Energi yang dapat disalurkan oleh pemanas dihitung menggunakan rumus [7]:

$$Q_{in} = AcG + Pf + Ph \quad (3)$$

Keterangan:

Q_{in}	= Energi pemanas (dalam Joule)
Ac	= Luas kolektor (bukan rak pengering)
G	= Intensitas radiasi matahari (W/m^2)
Pf	= Konsumsi energi <i>fan/blower</i> (W)
Ph	= Konsumsi energi pemanas (W)

Laju Pengeringan

Laju pengeringan dalam proses pengeringan dihitung untuk mengetahui berapa banyak air yang hilang dari bahan selama proses pengeringan. Laju ini sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan pengeringan seperti suhu, kelembapan, serta karakteristik bahan yang dikeringkan.

Rumus laju pengeringan [8]:

$$N = \frac{-Ss dX}{A d\theta} \quad (4)$$

Keterangan:

N	= Laju pengeringan ($kg H_2O$ yang diuapkan/jam m^2)
Ss	= Berat bahan kering (kg)
A	= Luas permukaan pengeringan (m^2)
dX	= Kadar air (moisture content, $kg H_2O/kg$ bahan kering)
$d\theta$	= Waktu (jam)

Efisiensi Pengeringan

Rumus efisiensi termal [6]:

$$\eta_c = \frac{mC(T_o - T_i)}{AcS} \times 100\% \quad (5)$$

Keterangan:

η_c	= efisiensi termal (%)
m	= Laju alir massa udara (kg/s)
C	= Kalor jenis udara (biasanya $1005 J/kg \cdot K$)
T_o, T_i	= Suhu outlet dan inlet udara
Ac	= Luas kolektor (bukan rak pengering)
S	= Intensitas radiasi matahari (W/m^2)

Rumus Laju Aliran Massa [7]:

$$\dot{m}_u = Pp A_t V_f \quad (6)$$

\dot{m}_u	= Laju alir massa udara (dalam kg/s)
Pp	= Massa jenis udara pemanas (dalam kg/m^3)
A_t	= Luas penampang tungku pemanas (dalam m^2)
V_f	= kecepatan fluida (dalam m/s)

Rumus Efisiensi Pengeringan [9]:

$$\eta_p = \frac{WL}{AcG + Pf + Ph} \times 100\% \quad (7)$$

Keterangan:

η_p	= Efisiensi Pengeringan
W	= Massa air yang diuapkan (kg)
L	= kalor laten penguapan air pada suhu udara keluar (J/kg)
Ac	= Luas kolektor (bukan rak pengering)
G	= Intensitas radiasi matahari (W/m^2)
Pf	= Konsumsi energi <i>fan/blower</i> (W)

Ph = Konsumsi energi pemanas (W)

Rumus ini menghitung efisiensi pengeringan (η) sebagai persentase dari massa yang hilang selama proses pengeringan dibandingkan dengan massa awal.

Specific Moisture Extraction Rate (SMER)

Untuk mengevaluasi kinerja sistem pengering secara termal dan membandingkan efisiensi dengan sistem lain, digunakan parameter *Specific Moisture Extraction Rate* (SMER). SMER adalah indikator yang menunjukkan jumlah air (dalam kilogram) yang berhasil diuapkan per satuan energi panas (dalam Megajoule) yang dikonsumsi oleh sistem pengering. Nilai SMER yang lebih tinggi mengindikasikan sistem yang lebih efisien karena mampu menguapkan lebih banyak air dengan energi yang lebih sedikit.

Rumus SMER dituliskan sebagai berikut [10]:

$$SMER = \frac{W}{Q_{in}} \quad (8)$$

Keterangan:

W = massa air yang menguap dari produk (kg)
 Q_{in} = Energi pemanas (dalam Joule)

Specific Energy Consumption (SEC)

Selain SMER, digunakan pula parameter *Specific Energy Consumption* (SEC) untuk mengukur jumlah energi panas (dalam Megajoule) yang dibutuhkan untuk menguapkan 1 kilogram air dari bahan yang dikeringkan. Nilai SEC yang lebih kecil menunjukkan efisiensi pengeringan yang lebih tinggi. Parameter ini sangat berguna untuk mengevaluasi kebutuhan energi sistem secara spesifik terhadap massa air yang diuapkan.

Rumus SEC dirumuskan sebagai berikut[10]:

$$SEC = \frac{Q_{in}}{W} \quad (9)$$

Keterangan:

Q_{in} = Energi pemanas (dalam Joule)
 W = Total energi panas yang dibutuhkan untuk pengeringan (Joule)

Perbandingan Pengeringan PVT dengan Pengeringan Terbuka

Perbandingan antara sistem pengeringan PVT (Photovoltaic Thermal) dan pengeringan terbuka dapat dihitung dengan menggunakan parameter Saving Drying Time (S). Parameter ini menunjukkan efisiensi waktu pengeringan yang dapat dicapai oleh sistem PVT dibandingkan dengan metode pengeringan terbuka.

Saving drying time dinyatakan dalam persentase dan dihitung menggunakan persamaan berikut [6]:

$$S = \frac{t_{OS} - t_{SD}}{t_{OS}} \times 100\% \quad (10)$$

S = Saving drying time (%)
 t_{OS} = Waktu pengeringan terbuka (jam)
 t_{SD} = Waktu pengeringan PVT (jam)

METODOLOGI

Penelitian ini dilakukan di Desa Cintelaksana, Kecamatan Tegalwaru, Kabupaten Karawang, Jawa Barat, pada bulan Februari hingga April 2024. Sistem pengering yang digunakan merupakan Photovoltaic Thermal (PVT) Dryer yang memanfaatkan panel surya monocrystalline 150 Wp sebagai sumber energi utama. Sistem ini dilengkapi dengan kolektor termal berbahan aluminium alloy sebagai absorber panas, saluran udara untuk distribusi panas, serta ruang pengering berbahan akrilik yang dirancang transparan agar meminimalkan kehilangan panas.

Untuk pengendalian suhu dan kelembapan secara otomatis, digunakan sistem IoT yang terdiri dari sensor suhu dan kelembapan DHT22 dan SHT31, mikrokontroler ESP32, modul LCD, serta koneksi nirkabel Wi-Fi untuk memantau data secara real-time.

Langkah-langkah penelitian meliputi:

1. Perancangan dan pembuatan sistem pengering PVT.
2. Pengujian alat di lapangan dengan kondisi sinar matahari alami.
3. Pengumpulan data selama 3 hari pengujian, masing-masing dari pukul 09.00 hingga 16.00 WIB (selama 7 jam/hari).
4. Parameter yang diamati: suhu dalam ruang pengering, kelembapan relatif udara, berat bahan setiap jam, serta radiasi matahari (G).

Bahan uji berupa terubuk seberat 1 kg per hari, dengan kadar air awal berkisar antara 47% hingga 49,9%. Selama proses pengeringan, berat bahan diukur tiap jam untuk menentukan massa air yang diuapkan.

Perhitungan energi panas yang dibutuhkan (Q_{in}) dilakukan dengan mengalikan massa air diuapkan dengan panas laten penguapan air sebesar $2,418 \times 10^6$ J/kg. Sementara itu, energi yang diterima dari panel surya diperoleh dari perkalian luas panel, intensitas radiasi matahari, dan durasi penyinaran.

Analisis efisiensi sistem meliputi:

1. Efisiensi Termal, yaitu perbandingan energi yang digunakan untuk menguapkan air terhadap energi yang diserap kolektor.
2. SMER (Specific Moisture Extraction Rate), yaitu jumlah air yang diuapkan per satuan energi (kg/MJ).
3. SEC (Specific Energy Consumption), yaitu jumlah energi yang dibutuhkan untuk menguapkan 1 kg air (MJ/kg).

Seluruh data direkam secara digital dan diolah menggunakan Microsoft Excel untuk analisis grafik dan perhitungan kinerja sistem.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja sistem PVT (Photovoltaic Thermal) Dryer berbasis Internet of Things (IoT) dalam proses pengeringan tanaman terubuk (*Saccharum edule*). Pengujian dilakukan selama tiga hari berturut-turut, masing-masing selama tujuh jam per hari, dimulai pukul 09.00 hingga 16.00 WIB. Sistem PVT dryer yang digunakan menggabungkan panel surya monofacial sebagai sumber energi utama dan sistem kendali otomatis berbasis sensor IoT untuk memantau suhu dan kelembapan ruang pengering secara real-time.

Setiap sesi pengujian mencakup pencatatan data suhu ruang pengering, kelembapan relatif, suhu lingkungan, kecepatan udara, kadar air bahan, dan berat bahan secara berkala setiap satu jam. Data tersebut digunakan untuk menghitung massa air yang diuapkan, yang dihitung berdasarkan selisih kadar air awal dan akhir dari berat bahan basah. Massa air ini kemudian menjadi dasar perhitungan kebutuhan energi pengeringan, menggunakan pendekatan panas laten penguapan air sebesar $2,418 \times 10^6$ J/kg.

Analisis lanjutan mencakup evaluasi performa sistem pengering dengan menghitung parameter efisiensi energi pengeringan, Specific Moisture Extraction Rate (SMER), dan Specific Energy Consumption (SEC).

Tabel 1. Hasil Pengujian 19 Mei 2025

Tanggal	Waktu	Temperatur Pengering (°C)	Kelembaban Ruang Pengering (%)	Data Cuaca	Suhu Lingkungan (°C)	Kecepatan Angin (m/s)	Kadar Air (%)	Berat Bahan (gram)
19-May-2025	09:00	30	75	Cerah Berawan	32	5	48	1000
19-May-2025	10:00	36	70	Cerah Berawan	34	5	42	949
19-May-2025	11:00	42	65	Cerah Berawan	36	5	37	897
19-May-2025	12:00	42	60	Cerah Berawan	37	5	32	846
19-May-2025	13:00	40	58	Cerah Berawan	38	5	27	794

Tanggal	Waktu	Temperatur Pengereng (°C)	Kelembaban Ruang Pengereng (%)	Data Cuaca	Suhu Lingkungan (°C)	Kecepatan Angin (m/s)	Kadar Air (%)	Berat Bahan (gram)
19-May-2025	14:00	38	55	Cerah Berawan	37	5	22	743
19-May-2025	15:00	36	52	Cerah Berawan	35	5	17	691
19-May-2025	16:00	34	50	Cerah Berawan	33	5	12	640

Tabel 2. Hasil Pengujian 20 Mei 2025

Tanggal	Waktu	Temperatur Pengereng (°C)	Kelembaban Ruang Pengereng (%)	Data Cuaca	Suhu Lingkungan (°C)	Kecepatan Angin (m/h)	Kadar Air (%)	Berat Bahan (gram)
20-May-2025	09:00	32	65	Cerah	33	3,75	47	1000
20-May-2025	10:00	38	60	Cerah	35	3,75	40	947
20-May-2025	11:00	42	55	Cerah	37	3,75	35	894
20-May-2025	12:00	42	50	Cerah	38	3,75	30	841
20-May-2025	13:00	40	48	Cerah	38	3,75	25	789
20-May-2025	14:00	38	45	Cerah	36	3,75	20	736
20-May-2025	15:00	36	42	Cerah	34	3,75	15	683
20-May-2025	16:00	34	40	Cerah	32	3,75	10	630

Tabel 3. Hasil Pengujian 21 Mei 2025

Tanggal	Waktu	Temperatur Pengereng (°C)	Kelembaban Ruang Pengereng (%)	Data Cuaca	Suhu Lingkungan (°C)	Kecepatan Angin (m/s)	Kadar Air (%)	Berat Bahan (gram)
21-May-2025	09:00	30	75	Berawan	32	2	49.9	1000
21-May-2025	10:00	36	70	Berawan	34	2	45	950
21-May-2025	11:00	42	65	Berawan	36	2	40	900
21-May-2025	12:00	42	60	Berawan	37	2	35	850
21-May-2025	13:00	40	58	Berawan	38	2	30	801
21-May-2025	14:00	38	55	Berawan	37	2	25	751
21-May-2025	15:00	36	52	Berawan	35	2	20	701
21-May-2025	16:00	34	50	Berawan	33	2	15	651

Tabel 4. Rata Rata Radiasi Matahari

Rata Rata Radiasi Matahari	
Tanggal	Radiasi (W/m ²)
19-May-25	617.1111111
20-May-25	647.2888889
21-May-25	612.1111111

Tabel 5. Pengeringan Konvensional

Waktu	Kadar Air Terubuk (%)	Suhu Lingkungan (°C)
Hari 1 - 09.00	46	32
Hari 1 - 10.00	44	34
Hari 1 - 11.00	43	36
Hari 1 - 12.00	39	37
Hari 1 - 13.00	37	38
Hari 1 - 14.00	35	37
Hari 1 - 15.00	34	35
Hari 1 - 16.00	33	33
Hari 2 - 09.00	31	33
Hari 2 - 10.00	29	35
Hari 2 - 11.00	26	37
Hari 2 - 12.00	24	38
Hari 2 - 13.00	20	38
Hari 2 - 14.00	17	36
Hari 2 - 15.00	14	34
Hari 2 - 16.00	12	32

Salah satu parameter penting dalam evaluasi kinerja sistem pengering adalah massa air yang berhasil diuapkan selama proses berlangsung. Parameter ini memberikan gambaran seberapa efektif sistem dalam mengurangi kadar air dari bahan basah menuju kadar air akhir yang diinginkan. Dalam penelitian ini, pengukuran massa air yang diuapkan dilakukan dengan pendekatan basis basah, yaitu menghitung selisih kadar air bahan sebelum dan sesudah proses pengeringan. Data ini menjadi dasar untuk perhitungan kebutuhan energi pengeringan serta efisiensi termal sistem secara keseluruhan. Tabel berikut menyajikan data kadar air awal, kadar air akhir, berat bahan basah, serta massa air yang diuapkan pada masing-masing hari pengujian.

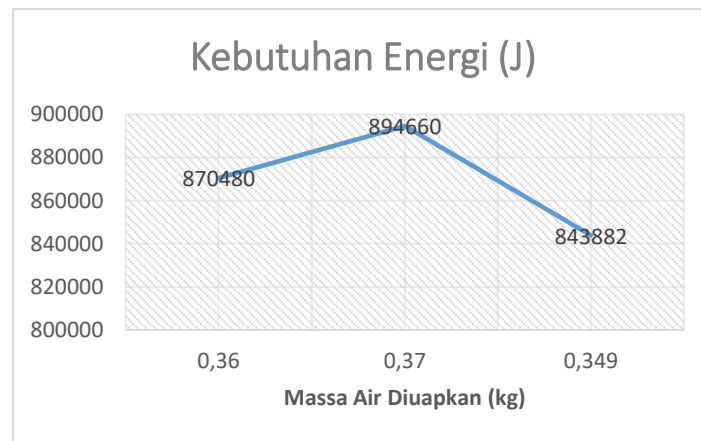
Tabel 6. Massa Air Yang Diuapkan

Hari	Kadar Air Awal (%)	Kadar Air Akhir (%)	Berat Basah (kg)	Massa Air Diuapkan (kg)
1	48	12	1	0.36
2	47	10	1	0.37
3	49.9	15	1	0.349

Berdasarkan data pada tabel, terlihat bahwa terdapat variasi massa air yang diuapkan pada masing-masing hari pengujian. Hari pertama mencatat penguapan sebesar 0,360 kg dari bahan dengan kadar air awal 48% dan kadar air akhir 12%. Hari kedua menunjukkan penguapan tertinggi, yaitu 0,370 kg, akibat kadar air akhir yang diturunkan hingga 10% dari kadar awal 47%. Sebaliknya, pada hari ketiga, meskipun kadar air awal mencapai 49,9%, nilai kadar air akhir hanya diturunkan sampai 15%, sehingga massa air yang diuapkan lebih rendah yaitu 0,349 kg. Temuan ini mengindikasikan bahwa penurunan kadar air akhir yang lebih signifikan menghasilkan penguapan air yang lebih besar, meskipun kadar air awal tidak selalu menjadi faktor penentu utama. Oleh karena itu, pengaturan kadar air akhir menjadi faktor kunci dalam pengendalian efisiensi energi selama proses pengeringan.

Energi yang disuplai ke sistem pengeringan merupakan aspek krusial dalam menilai efisiensi termal dan kinerja sistem secara keseluruhan. Dalam penelitian ini, total energi masuk ke sistem Q_{in} berasal dari dua sumber utama, yaitu radiasi matahari yang diserap oleh kolektor surya dan energi listrik yang digunakan untuk mengoperasikan kipas serta elemen pemanas. Jumlah energi panas yang dibutuhkan untuk menguapkan air dari bahan dihitung berdasarkan massa air yang diuapkan dikalikan dengan panas laten penguapan air, dengan asumsi suhu operasi berkisar antara 35–40°C. Perhitungan ini bertujuan untuk mengidentifikasi seberapa besar energi yang benar-benar digunakan untuk proses evaporasi

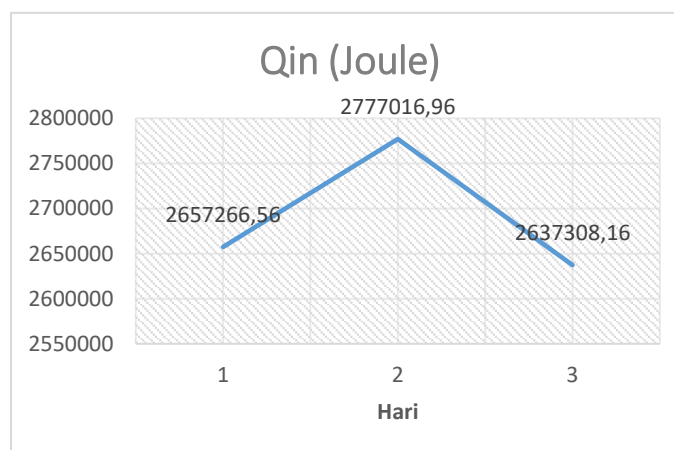
dibandingkan dengan total energi yang tersedia. Grafik berikut menyajikan hasil kebutuhan energi pengeringan berdasarkan data eksperimen selama tiga hari pengujian:



Gambar 1. Grafik Kebutuhan Energi (J)

Berdasarkan data pada tabel, terlihat bahwa kebutuhan energi pengeringan berbanding lurus dengan massa air yang diuapkan. Hari kedua mencatat kebutuhan energi tertinggi yaitu sebesar 894.660 Joule, sejalan dengan jumlah massa air yang diuapkan paling besar (0,370 kg). Sebaliknya, pada hari ketiga, kebutuhan energi tercatat paling rendah yaitu 843.882 Joule, karena massa air yang diuapkan pun lebih sedikit. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar volume air yang diuapkan, maka semakin tinggi energi panas yang diperlukan, sesuai prinsip dasar pengeringan termal. Variasi kebutuhan energi ini menjadi acuan penting dalam evaluasi efisiensi energi sistem, serta sebagai dasar pertimbangan dalam optimasi desain dan operasi sistem pengering berbasis energi terbarukan.

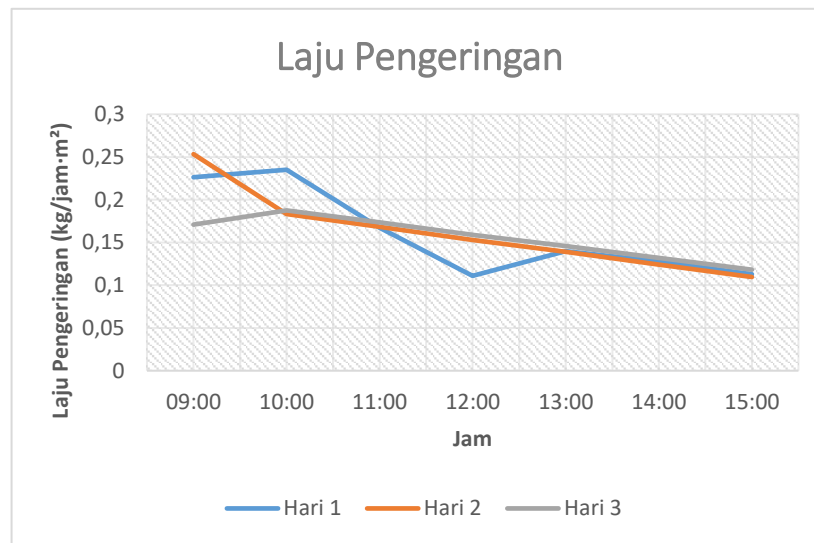
Energi total yang masuk ke dalam sistem pengering (Q_{in}) merupakan gabungan dari energi radiasi matahari yang diterima oleh permukaan kolektor surya A dan kontribusi energi dari elemen pemanas, yaitu kipas (Pf) dan pemanas listrik (Ph). Besarnya nilai Q_{in} sangat dipengaruhi oleh intensitas radiasi matahari (G) yang berbeda-beda setiap harinya, yaitu sebesar 0,617 kWh, 0,647 kWh, dan 0,612 kWh. Ketiga nilai tersebut telah dikonversi ke dalam satuan Joule guna mempermudah perhitungan dan analisis performa energi sistem



Gambar 2. Energi yang Dihasilkan

Hasil grafik menunjukkan bahwa nilai energi masuk tertinggi terjadi pada hari kedua, yaitu sebesar 2.777.016,96 Joule, diikuti oleh hari pertama sebesar 2.657.266,56 Joule, dan nilai terendah tercatat pada hari ketiga, yaitu 2.637.308,16 Joule. Pola ini mengindikasikan bahwa fluktuasi radiasi matahari harian memiliki pengaruh langsung terhadap total energi yang tersedia bagi sistem. Variasi ini penting untuk dipertimbangkan dalam upaya optimasi desain sistem pengering berbasis energi surya agar performa pengeringan tetap konsisten.

Analisis terhadap laju pengeringan dilakukan berdasarkan data eksperimen selama tiga hari berturut-turut pada tanggal 19, 20, dan 21 Mei 2025. Data diperoleh dari pencatatan kadar air dan berat bahan setiap jam selama proses pengeringan berlangsung. Perhitungan laju pengeringan menggunakan pendekatan basis kering (dry basis), dengan tujuan untuk mengetahui pola pengeringan, waktu efektif, serta pengaruh kondisi lingkungan terhadap kecepatan penguapan.



Gambar 3. Laju Pengeringan

Hasil grafik menunjukkan bahwa laju pengeringan tertinggi terjadi pada pukul 10.00 hari kedua, yaitu sebesar 0,2533 kg/jam·m², saat suhu ruang pengering dan intensitas matahari optimal. Seiring berjalannya waktu, laju pengeringan menurun, mencerminkan peralihan dari fase constant rate drying ke falling rate drying. Tren ini relatif konsisten selama tiga hari, dengan sedikit fluktuasi yang disebabkan oleh perubahan cuaca. Temuan ini memperkuat bahwa performa sistem pengering sangat bergantung pada kondisi lingkungan dan karakteristik bahan, serta dapat menjadi acuan dalam pengembangan sistem pengering berbasis energi terbarukan yang lebih efisien.

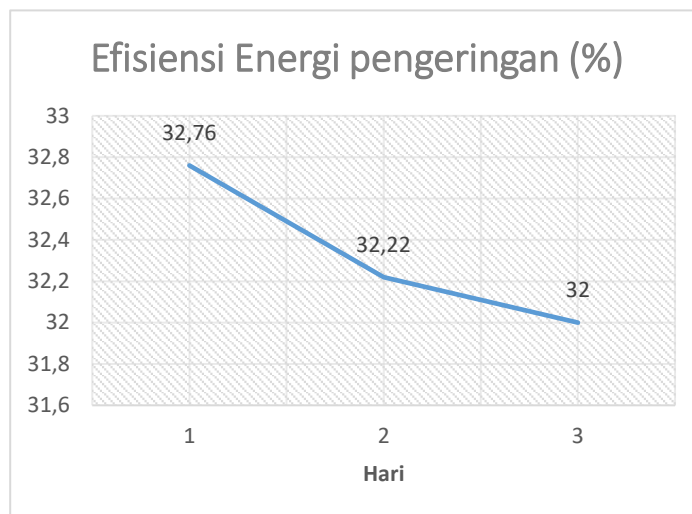
Evaluasi terhadap efisiensi termal kolektor surya dilakukan untuk menilai kemampuan sistem dalam mengubah radiasi matahari menjadi energi panas yang berguna dalam proses pengeringan. Perhitungan efisiensi ini memperhitungkan laju massa aliran udara, selisih suhu masuk dan keluar kolektor, serta intensitas radiasi yang diterima permukaan kolektor. Selain itu, dianalisis pula efisiensi energi pengeringan (η_p), yaitu seberapa besar proporsi energi yang benar-benar digunakan untuk menguapkan air dari bahan dibandingkan total energi masuk sistem.

Tabel 7. Efisiensi Termal

Hari	Kecepatan Udara (m/s)	Radiasi Matahari (W/m ²)	Laju Massa (kg/s)	Q _{in} (Watt)	Q _s (Watt)	Efisiensi η_c (%)
1	5	617	0.12357	620.77	684.13	90.74
2	3.75	647	0.09268	465.47	717.57	64.89
3	2	612	0.04937	248.53	678.83	36.61

Hasil menunjukkan bahwa efisiensi termal tertinggi sebesar 90,74% dicapai pada kecepatan udara 5 m/s pada hari pertama. Hal ini mengindikasikan bahwa peningkatan aliran udara meningkatkan laju konversi panas. Sebaliknya, efisiensi termal menurun drastis hingga 36,61% pada kecepatan 2 m/s. Untuk efisiensi energi pengeringan (η_p), nilai berkisar antara 32,00% hingga 32,78%, dengan capaian tertinggi juga terjadi pada hari pertama. Temuan ini menunjukkan bahwa kecepatan udara dan intensitas radiasi merupakan faktor dominan yang memengaruhi efektivitas sistem pengering berbasis kolektor surya.

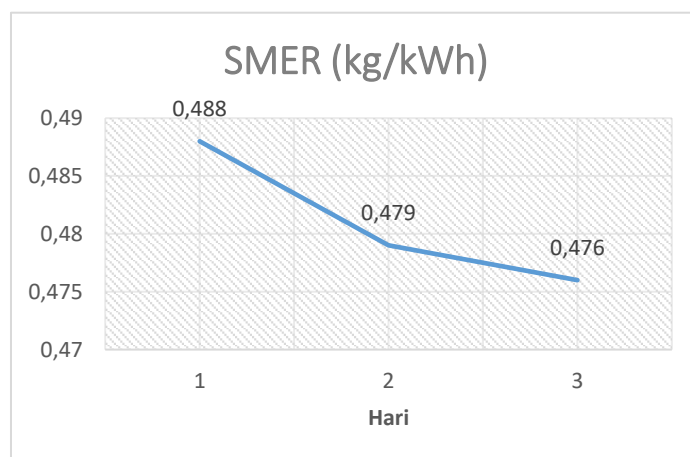
Evaluasi efisiensi energi pengeringan dilakukan untuk mengetahui seberapa besar proporsi energi yang benar-benar dimanfaatkan dalam menguapkan air dari bahan dibandingkan dengan total energi yang masuk ke sistem. Perhitungan dilakukan selama tiga hari pengujian, dengan mempertimbangkan massa air yang diuapkan dan total energi masuk dari radiasi matahari serta elemen pemanas.



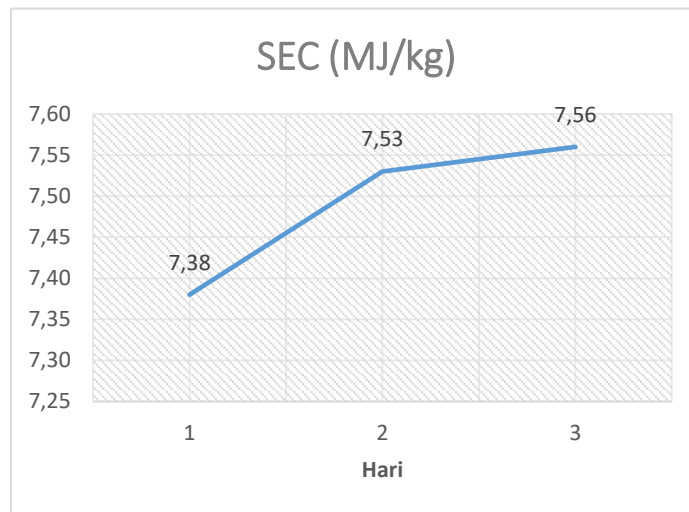
Gambar 4. Grafik Efisiensi Energi Pengeringan

Hasil menunjukkan bahwa efisiensi tertinggi sebesar 32,76% terjadi pada hari pertama, saat terdapat keseimbangan optimal antara energi masuk dan air yang diuapkan. Hari kedua mencatat efisiensi 32,22%, meskipun massa air yang diuapkan lebih besar, namun energi masuk juga meningkat signifikan. Efisiensi terendah terjadi pada hari ketiga 32,00%, saat air yang diuapkan paling sedikit. Temuan ini menegaskan bahwa efisiensi tidak hanya ditentukan oleh besarnya energi masukan, tetapi juga oleh jumlah air yang berhasil diuapkan secara efektif selama proses berlangsung.

Evaluasi performa termal sistem pengering dilanjutkan dengan menghitung dua parameter penting, yaitu Specific Moisture Extraction Rate (SMER) dan Specific Energy Consumption (SEC). SMER menggambarkan kemampuan sistem dalam menguapkan air per satuan energi (kg/kWh), sedangkan SEC menunjukkan jumlah energi panas (dalam MJ) yang dibutuhkan untuk menguapkan satu kilogram air. Kedua parameter ini saling melengkapi dalam menilai efisiensi termal keseluruhan sistem.



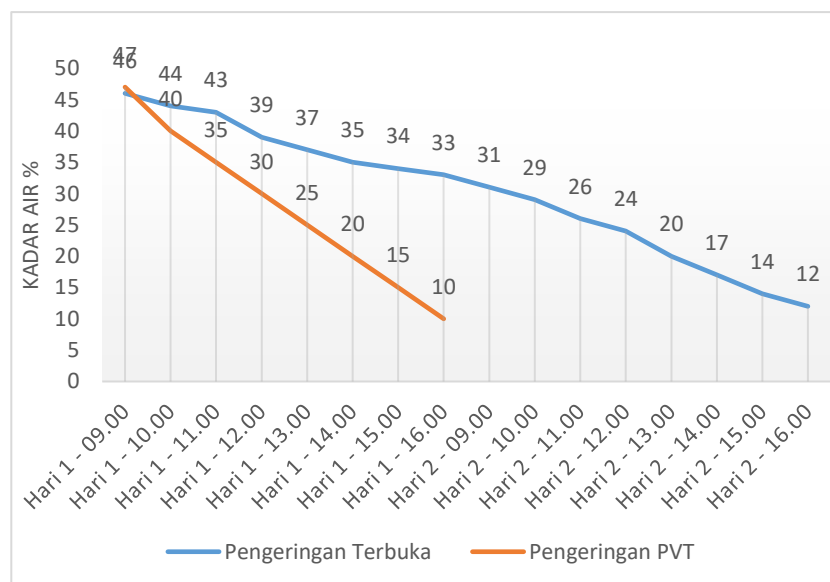
Gambar 5. Grafik Specific Moisture Extraction Rate



Gambar 6. Grafik *Specific Energy Consumption*

Hasil pengujian menunjukkan bahwa SMER tertinggi sebesar 0,488 kg/kWh terjadi pada hari pertama, diikuti oleh penurunan bertahap pada hari kedua dan ketiga. Sementara itu, nilai SEC terendah tercatat sebesar 7,38 MJ/kg juga pada hari pertama, menandakan konsumsi energi yang paling efisien untuk setiap kilogram air yang diuapkan. Pola ini konsisten menunjukkan bahwa hari pertama merupakan kondisi paling optimal, dengan keseimbangan terbaik antara energi yang digunakan dan massa air yang diuapkan. Hal ini mengindikasikan bahwa performa sistem sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, serta menegaskan pentingnya pengendalian energi dan pengaturan kadar air target untuk mencapai efisiensi maksimum.

Perbandingan antara sistem pengeringan PVT dan metode pengeringan terbuka dilakukan untuk menilai efisiensi waktu dalam menurunkan kadar air bahan. Parameter yang digunakan adalah perubahan kadar air terhadap waktu selama proses berlangsung. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem PVT secara signifikan mempercepat proses pengeringan dibandingkan metode konvensional.



Gambar 7. Grafik Perbandingan Pengeringan PVT Dengan Pengeringan Terbuka

Berdasarkan grafik di atas, sistem PVT hanya membutuhkan waktu 7 jam untuk menurunkan kadar air dari 46% menjadi 10%, sedangkan pengeringan terbuka memerlukan waktu hingga 14 jam untuk mencapai kadar air akhir sebesar 12%. Perhitungan Saving Drying Time menunjukkan efisiensi waktu sebesar 50%, yang menandakan bahwa PVT dryer mampu

menghemat separuh waktu pengeringan. Selain mempercepat proses, sistem ini juga berpotensi menurunkan konsumsi energi, sehingga layak diterapkan sebagai alternatif pengeringan efisien dan berkelanjutan, terutama di sektor pertanian tropis.

KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini membuktikan bahwa sistem PVT (Photovoltaic Thermal) Dryer berbasis IoT mampu meningkatkan efisiensi proses pengeringan tanaman terubuk (*Saccharum edule*). Sistem ini berhasil menguapkan massa air sebesar 0,349–0,370 kg per 1 kg bahan basah dengan efisiensi energi pengeringan berkisar antara 32,00% hingga 32,78%. Nilai efisiensi termal kolektor tertinggi dicapai sebesar 90,74% pada kecepatan udara 5 m/s, dan nilai SMER tertinggi sebesar 0,488 kg/kWh serta SEC terendah 7,38 MJ/kg menunjukkan performa sistem yang optimal terjadi pada hari pertama pengujian.

Selain itu, sistem ini juga mampu menghemat waktu pengeringan hingga 50% dibandingkan dengan metode pengeringan terbuka, hanya memerlukan waktu 7 jam dibandingkan 14 jam pada pengeringan konvensional. Hasil ini menunjukkan bahwa kombinasi antara pemanfaatan energi surya dan pengendalian berbasis IoT menjadikan PVT dryer sebagai solusi efisien, ramah lingkungan, dan layak dikembangkan lebih lanjut untuk pengolahan hasil pertanian, khususnya di daerah tropis.

Untuk pengembangan lebih lanjut, disarankan agar sistem PVT dryer ini diuji terhadap berbagai jenis komoditas pertanian guna menguji fleksibilitas dan performa lintas bahan. Selain itu, peningkatan akurasi dan kecerdasan sistem kontrol berbasis IoT juga perlu dilakukan, misalnya dengan menerapkan algoritma pengendalian adaptif terhadap suhu dan kelembapan. Implementasi sistem penyimpanan energi (battery storage) juga dapat dipertimbangkan agar sistem tetap berfungsi saat intensitas matahari rendah. Evaluasi lebih lanjut dalam kondisi cuaca ekstrem seperti mendung atau hujan juga penting untuk memastikan keandalan sistem sepanjang tahun.

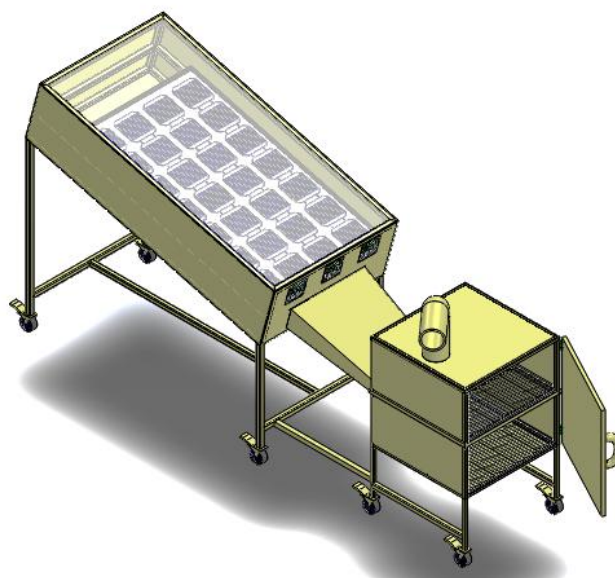
DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. Bangun, A. Penger, and T. Terubuk, "Schrodinger," vol. 4, no. 2, pp. 157–161, 2023.
- [2] Suwandi and Nasruddin, "Pengembangan Sistem Pengeringan Fotovoltaik Termal untuk Peningkatan Efisiensi Energi.," *J. Energi Terbarukan Indones.*, vol. 6, no. 2, pp. 45–51, 2017.
- [3] G. Heru Sandi and Y. Fatma, "Pemanfaatan Teknologi Internet of Things (Iot) Pada Bidang Pertanian," *JATI (Jurnal Mhs. Tek. Inform.*, vol. 7, no. 1, pp. 1–5, 2023, doi: 10.36040/jati.v7i1.5892.
- [4] S. Rahayoe, "Teknik Pengeringan," *Departemen Teknik Pertanian Fakultas Teknologi Pertanian Universitas Gadjah Mada*, 2017. [Online]. Available: <https://teknik-pengeringan.tp.ugm.ac.id/2017/10/28/teknik-pengeringan/#:~:text=Pengeringan adalah suatu cara untuk,dapat merusak menjadi tidak aktif>
- [5] Subarjo, T. Widodo, and M. K. Yusufiar, "Modifikasi pengering tenaga surya dengan ventilator otomatis," *TekTan*, vol. 7, no. 3, pp. 145–212, 2015.
- [6] A. Fudholi, M. H. Ruslan, and M. F. Ngatiman, "Performance of Solar Drying System with Rotating Rack for Malaysian Red Chili (Chili Bangi)," no. January, pp. 132–137, 2012.
- [7] M. F. Suhelmi, R. D. Anjani, and N. Fauji, "Perhitungan Efisiensi Pengeringan pada Mesin Pengering Gabah Tipe Flat Bed Dryer di CV. XYZ," *J. Rekayasa Mesin*, vol. 17, no. 1, p. 15, 2022, doi: 10.32497/jrm.v17i1.2848.
- [8] Y. N. Ratnasari, "Pengaruh Suhu Dan Lama Perendaman Terhadap Laju Pengeringan Kacang Hijau Pada Kinerja Alat Rotary Dryer," *Skripsi. Progr. Stud. DIPLOMA III Tek. Kim. Progr. DIPLOMA Fak. Tek. Univ. DIPONEGORO*, pp. 4–15, 2018.
- [9] U. M. Arief, A. Suryanto, and S. Suryanto, "Peningkatan Kualitas Produk Dan Efisiensi Energi Pada Alat Pengeringan Daun Seledri Berbasis Kontrol Suhu Dan Humidity Udara," *Peningkatan Kualitas Prod. Dan Efisiensi Energi Pada Alat Pengeringan Daun Seledri Berbas. Kontrol Suhu Dan Humidity Udar.*, vol. 12, no. 2, pp. 171–181, 2014.
- [10] A. Fudholi, K. Sopian, M. H. Yazdi, M. H. Ruslan, M. Gabbasa, and H. A. Kazem, "Performance analysis of solar drying system for red chili," *Sol. Energy*, vol. 99, pp. 47–54, 2014, doi: 10.1016/j.solener.2013.10.019.

NOMENKLATUR

Simbol / Istilah	Keterangan	Satuan
Ac	Luas kolektor surya	m ²
At	Luas penampang tungku pemanas	m ²
C	Kapasitas panas jenis udara	J/kg·K
G	Intensitas radiasi matahari	W/m ² atau kWh/m ²
h	Koefisien perpindahan panas konveksi	W/m ² ·K
k	Konduktivitas termal udara	W/m·K
L	Panas laten penguapan air	J/kg
ṁ	Laju alir massa udara	kg/s
N	Laju pengeringan	kg/jam·m ²
Pf	Daya fan / blower	kWh
Ph	Daya pemanas	kWh
Pr	Bilangan Prandtl	-
Qin	Energi total masuk ke sistem	J
Qout	Energi yang digunakan untuk penguapan	J
Qs	Energi yang diterima kolektor surya	W
ρ	Massa jenis udara	kg/m ³
SMER	Specific Moisture Extraction Rate	kg/kWh atau kg/MJ
SEC	Specific Energy Consumption	kWh/kg atau MJ/kg
S	Saving Drying Time	%
V	Kecepatan aliran udara	m/s
W	Massa air yang diuapkan	kg
ηc	Efisiensi termal kolektor	%
ηp	Efisiensi energi pengering	%

LAMPIRAN



Model 3D PVT



PVT Dengan Absorber