

Pengaruh Variasi Suhu Kondensor terhadap Kinerja Rotary Vacuum Evaporator pada Ekstraksi Meniran (*Phyllanthus Niruri*)

Effect of Condenser Temperature Variation on the Performance of Rotary Vacuum Evaporator in Phyllanthus Niruri Extraction

Dwi Heru Siswantoro^{1*}, Yayang Permadi¹, Revvan Rifada Pradiza¹, Sekarsari², Rizka Yusvida²

¹Program Studi Teknologi Mesin, Politeknik Internasional Tamansiswa Mojokerto, Mojokerto 61311, Indonesia

²Program Studi Teknologi Listrik, Politeknik Internasional Tamansiswa Mojokerto, Mojokerto 61311, Indonesia

*Corresponding author: dwiherusiswantoro@gmail.com

Diterima: 08-10-2025

Disetujui: 22-11-2025

Dipublikasikan: 28-12-2025

IRAJTMA is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.



Abstrak

Penelitian ini menganalisis pengaruh variasi suhu kondensor terhadap kinerja rotary vacuum evaporator (RVE) dalam ekstraksi larutan meniran (*Phyllanthus niruri*). Tiga kondisi diuji, yaitu suhu kondensor 23 °C, 30 °C, dan tanpa pendinginan, masing-masing dengan lima replikasi. Parameter yang diamati meliputi waktu evaporasi, laju pengurangan massa, konsumsi energi, dan kadar flavonoid, dengan analisis statistik menggunakan *Analysis of Variance* (ANOVA). Hasil menunjukkan bahwa kondensor 23 °C menghasilkan laju pengurangan massa tertinggi (3,78 g/menit) dan konsumsi energi terendah (0,14 kWh). Pada 30 °C dan tanpa pendinginan, laju pengurangan massa menurun menjadi 3,02 g/menit dan 2,24 g/menit, sedangkan konsumsi energi meningkat menjadi 0,19 kWh dan 0,20 kWh. Kondensor 23 °C juga memberikan kadar flavonoid tertinggi (11,9 mg/mL), menunjukkan efisiensi termal yang optimal. Penelitian ini mengisi kekosongan studi mengenai pengaruh suhu kondensor terhadap efisiensi energi dan kualitas ekstrak pada sistem RVE, serta memberikan dasar pengembangan alat evaporasi hemat energi untuk industri herbal skala kecil.

Kata Kunci: Rotary vacuum evaporator, Suhu kondensor, Efisiensi energi, Ekstraksi herbal.

Abstract

This study analyzes the effect of condenser temperature variation on the performance of a rotary vacuum evaporator (RVE) in extracting *Phyllanthus niruri* solution. Three condenser conditions, 23 °C, 30 °C, and without cooling, were tested, each with five replications. Observed parameters included evaporation time, mass reduction rate, energy consumption, and flavonoid content, which were analyzed statistically using *Analysis of Variance* (ANOVA). Results showed that the 23 °C condenser achieved the highest mass reduction rate (3.78 g/min) and the lowest energy consumption (0.14 kWh). At 30 °C and without cooling, mass reduction rates decreased to 3.02 g/min and 2.24 g/min, while energy consumption rose to 0.19 kWh and 0.20 kWh. The 23 °C condenser also produced the highest flavonoid content (11.9 mg/mL), confirming optimal thermal efficiency. This work fills the research gap on the effect of condenser temperature on energy efficiency and extract quality in RVE systems and provides a basis for developing energy-efficient evaporators for small-scale herbal industries.

Keywords: Rotary vacuum evaporator, Condenser temperature, Energy efficiency, Herbal extraction.

1. Pendahuluan

Perkembangan teknologi ekstraksi hijau berperan penting dalam menggantikan metode konvensional untuk memperoleh senyawa bioaktif dari tanaman obat. Teknik seperti *microwave-assisted extraction* (MAE), *ultrasound-assisted extraction* (UAE), *pressurized liquid extraction*

(PLE), dan *enzyme-assisted extraction* (EAE) terbukti mampu meningkatkan rendemen fenolik dan *flavonoid* dibandingkan metode tradisional seperti maserasi atau Soxhlet (Uwineza and Waśkiewicz 2020; Lefebvre et al. 2021; Cetinkaya et al. 2025). Metode-metode tersebut mendukung prinsip keberlanjutan karena menggunakan suhu operasi lebih rendah, waktu proses singkat, serta konsumsi pelarut yang minimal (Pogorzelska-Nowicka et al. 2024).

Dalam rantai proses ekstraksi modern, *rotary vacuum evaporator* (RVE) berfungsi penting sebagai alat pengental ekstrak yang mampu mempertahankan kualitas senyawa aktif. Penelitian oleh Kulikova et al. (2023) menunjukkan bahwa pengaturan kondisi operasi RVE yang optimal dapat meningkatkan kandungan polifenol dan antosianin hingga lebih dari 1,8 kali lipat, sekaligus menjaga sifat sensoris produk. Salah satu parameter kunci yang menentukan kinerja RVE adalah suhu kondensor, yang berpengaruh langsung terhadap efisiensi kondensasi uap dan pemulihan pelarut (Wang et al. 2018; H. Al-Hassani and R. Al-Badri 2021).

Selain aspek kualitas hasil, efisiensi energi juga menjadi isu utama dalam pengoperasian RVE. Berbagai pendekatan untuk menurunkan konsumsi energi telah dikembangkan, seperti pemanfaatan pompa kalor, sistem multi-efek, dan pengaturan suhu pemanas serta pendingin secara presisi (Smirnov et al. 2017; Nechyporenko et al. 2024; Makarov et al. 2022). Inovasi ini sejalan dengan tren teknologi hijau yang berfokus pada optimalisasi kinerja termal dan keberlanjutan proses.

Kandungan fenolik dan flavonoid pada ekstrak tanaman obat dipengaruhi oleh jenis pelarut dan kondisi proses (Mazaraie et al. 2018; Lezoul et al. 2020; Ng et al. 2020). Oleh karena itu, pemilihan parameter operasi yang tepat pada tahap evaporasi sangat penting untuk menjaga stabilitas senyawa bioaktif. Pendekatan statistik seperti Analysis of Variance (ANOVA) dan Response Surface Methodology (RSM) terbukti efektif dalam menentukan kondisi optimum proses ekstraksi (Kadir 2021; Le et al. 2025; Mohamad Said and Mohamed Amin 2016).

Meskipun berbagai studi telah meneliti metode ekstraksi dan optimasi kondisi proses, belum ada penelitian yang secara eksperimental mengkaji pengaruh suhu kondensor terhadap efisiensi energi dan kadar flavonoid pada proses ekstraksi herbal menggunakan RVE. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi suhu kondensor (23°C, 30°C, dan tanpa kondensor) terhadap performa rotary vacuum evaporator pada ekstraksi meniran (*Phyllanthus niruri*). Evaluasi mencakup parameter waktu evaporasi, laju pengurangan massa, konsumsi energi, serta kadar flavonoid, di mana Peneliti menganalisisnya menggunakan ANOVA untuk menentukan signifikansi pengaruh tiap perlakuan.

2. Metode

2.1. Alat dan Bahan Penelitian

Penelitian ini menggunakan *rotary vacuum evaporator* (RVE) sebagai alat utama dengan sistem kondensor vertikal berdiameter 100 mm dan tinggi 530 mm. RVE memiliki kapasitas labu evaporasi 5 L (flange #50, Ø230 mm) dan labu penampung 3 L (Ø195 mm) yang terbuat dari kaca GG-17 tahan panas. Sistem pemanas air menggunakan tabung berbahan SS304 dengan volume 10,5 L (Ø280×170 mm) dan daya 2000 W. Kontrol suhu dijalankan menggunakan sistem PID dengan ketelitian $\pm 1^\circ\text{C}$ dan rentang pemanasan 25–99°C. Motor penggerak memiliki daya 40 W dengan kecepatan rotasi variabel antara 0–120 rpm, sedangkan sistem pengangkatan water bath dikendalikan secara manual dengan panjang langkah 200 mm.

Sistem vakum menggunakan pompa tipe VE115N dengan laju aliran 57 L/menit (2,0 CFM) dan daya $\frac{1}{4}$ HP pada tegangan 230 V/50–60 Hz. Pompa sirkulasi model ETD-5800 melakukan pendinginan dengan debit maksimum 5800 L/jam, daya listrik 38 W, dan daya dorong 5 m. Sistem

sensor internal RVE melakukan pengukuran suhu dan tekanan melalui panel kontrol digital yang terhubung. Konsumsi energi diukur menggunakan power meter digital dengan resolusi 0,01 kWh dan akurasi $\pm 0,01$ kWh. Peneliti menggunakan timbangan digital dengan ketelitian $\pm 0,01$ g untuk mengukur massa, sedangkan mereka mengukur volume larutan menggunakan gelas ukur berketelitian ± 1 mL.

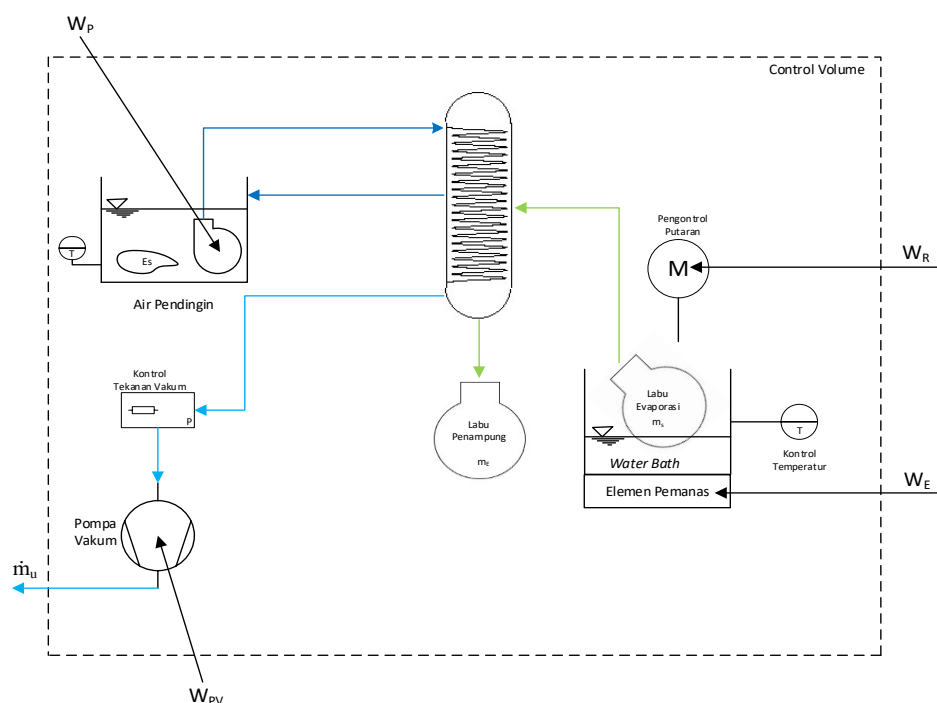
Bahan penelitian terdiri atas serbuk daun meniran (*Phyllanthus niruri*) hasil pengayakan mesh 40 serta pelarut etanol 96% (kemurnian $\geq 99,5\%$). Sebanyak 100 gram serbuk meniran diekstraksi menggunakan etanol dengan rasio 1:10 (b/v). Peneliti melakukan proses maserasi selama tiga hari dengan pengadukan setiap enam jam, kemudian menyaringnya menggunakan kain flanel untuk memperoleh larutan ekstrak etanolik meniran.

2.2. Variabel Penelitian

Variabel bebas pada penelitian ini adalah suhu air masuk kondensor, dengan tiga variasi yaitu 23°C, 30°C, dan tanpa pendinginan (kondensor dimatikan). Variabel terikat meliputi waktu evaporasi, laju pengurangan massa, konsumsi energi listrik, dan kadar *flavonoid* total. Variabel kontrol mencakup kecepatan rotasi labu 60 rpm, suhu water bath 60°C, tekanan vakum 50–70 kPa, serta laju aliran pompa vakum sebesar 12 L/menit.

2.3. Prosedur Penelitian

Penelitian dilaksanakan melalui tiga tahapan utama, yaitu tahap persiapan, pelaksanaan, dan pengambilan data. Pada tahap persiapan, peneliti melakukan kalibrasi sistem kontrol suhu, rotasi, dan tekanan vakum untuk memastikan kestabilan kerja alat. Larutan ekstrak meniran yang telah disiapkan kemudian dimasukkan ke dalam labu evaporasi berkapasitas 5 L.



Gambar 1. Skema sistem rotary vacuum evaporator dengan kontrol suhu, tekanan dan pendingin air

Pada tahap pelaksanaan, RVE dioperasikan pada suhu water bath 60°C dan kecepatan rotasi 60 rpm. Sistem vakum diatur agar tekanan operasi berada pada kisaran 50–70 kPa, sementara suhu air pendingin kondensor divariasikan pada tiga kondisi: 23°C, 30°C, dan tanpa pendinginan. Penulis melakukan lima kali pengulangan untuk setiap variasi, sehingga total

terdapat 15 kali percobaan. Parameter yang diamati meliputi waktu evaporasi, berat dan volume larutan sebelum serta sesudah proses, serta konsumsi energi listrik.

Peneliti melakukan tahap pengambilan data secara langsung selama proses evaporasi berlangsung. Parameter yang diamati meliputi waktu evaporasi, berat dan volume larutan sebelum serta sesudah proses, serta konsumsi energi listrik yang dibaca melalui power meter digital. Setelah proses selesai, semua data direkap dan diolah untuk memperoleh nilai waktu evaporasi, laju pengurangan massa, konsumsi energi, serta kadar flavonoid total. Gambar 1 menunjukkan skema sistem RVE yang Peneliti gunakan dalam penelitian ini, sedangkan konfigurasi alat eksperimen dan panel kontrol otomatis dijelaskan pada Gambar 2.



Gambar 2. Rangkaian alat eksperimen RVE dengan sistem kontrol otomatis berbasis panel pengatur. Komponen utama: (1) labu evaporasi, (2) kondensor vertikal, (3) labu penampung, (4) pompa vakum, (5) pompa sirkulasi air pendingin, (6) water bath dan (7) panel kontrol

2.4. Analisis Data

Peneliti menganalisis data hasil eksperimen untuk menentukan hubungan antara variasi suhu kondensor terhadap kinerja sistem RVE. Parameter utama yang dihitung meliputi waktu evaporasi (t_e), laju pengurangan massa ($\dot{m}$), konsumsi energi listrik (E), dan kadar flavonoid total (F_t). Kadar flavonoid diukur menggunakan metode spektrofotometri dengan reagen $AlCl_3$ pada panjang gelombang 415 nm.

Peneliti melakukan analisis statistik menggunakan *Analysis of Variance* (ANOVA) dengan tingkat signifikansi 95% ($\alpha = 0,05$). Peneliti menggunakan Uji ANOVA untuk menilai pengaruh suhu kondensor terhadap parameter-parameter kinerja. Hipotesis nol (H_0) menyatakan bahwa suhu kondensor tidak memiliki pengaruh signifikan terhadap parameter pengujian, sedangkan hipotesis alternatif (H_1) menyatakan bahwa suhu kondensor memberikan pengaruh signifikan terhadap hasil pengukuran.

3. Hasil dan Pembahasan

Bagian ini menyajikan hasil penelitian yang telah penulis lakukan serta membahas waktu evaporasi, pengaruh suhu air masuk kondensor pada RVA, dan kandungan flavonoid dari ekstrak

kental larutan meniran untuk masing-masing variasi.

3.1. Waktu Evaporasi

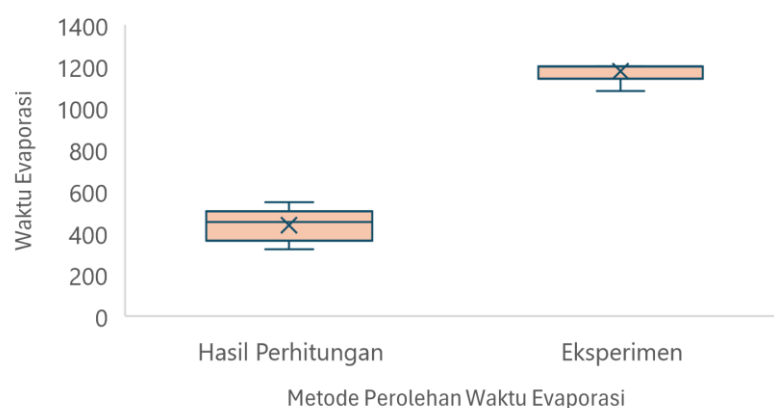
Waktu evaporasi merupakan salah satu parameter utama yang menggambarkan efisiensi proses penguapan pada sistem *rotary vacuum evaporator* (RVE). Peneliti memperoleh waktu evaporasi larutan meniran–etanol baik melalui perhitungan teoretis maupun hasil pengamatan langsung menggunakan stopwatch, dengan pencatatan dimulai ketika labu mulai berputar dan dihentikan saat seluruh larutan menempel pada dinding bagian dalam labu. Perbandingan antara waktu hasil perhitungan dan hasil eksperimen disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Waktu Evaporasi Larutan Meniran dan Etanol

Replikasi	Waktu Evaporasi (detik)	
	Hasil Perhitungan	Eksperimen
1	452	1200
2	403	1080
3	321	1200
4	547	1200
5	460	1200

Hasil pengamatan menunjukkan waktu evaporasi aktual lebih besar dibandingkan nilai perhitungan teoretis. Perbedaan ini disebabkan oleh kondisi nyata proses, seperti fluktuasi tekanan vakum, efisiensi perpindahan panas antara labu dan pelarut, serta resistansi termal dinding kaca. Secara termodinamika, waktu evaporasi berbanding terbalik dengan laju perpindahan panas pada permukaan penguapan, di mana peningkatan perbedaan suhu antara pelarut dan media kondensasi memperbesar *driving force* penguapan sehingga waktu yang dibutuhkan menjadi lebih singkat (Chatterjee et al. 2019).

Dalam sistem RVE, penurunan tekanan parsial pelarut di bawah kondisi vakum menyebabkan titik didih turun secara signifikan, sehingga meskipun suhu pemanas relatif rendah (60 °C), proses penguapan tetap berlangsung cepat (Said and Louhi-Kultanen 2019). Perbedaan antara hasil teoritis dan eksperimen juga dapat dikaitkan dengan efisiensi perpindahan panas aktual yang lebih rendah dari kondisi ideal. Chatterjee et al. (2019) melaporkan bahwa kehilangan panas melalui dinding kaca dan fluktuasi tekanan vakum merupakan penyebab utama meningkatnya waktu penguapan pada rotary evaporator dibandingkan model konstan.



Gambar 3. Perbandingan Waktu Evaporasi secara teoritis dan eksperimen

Selain itu, turbulensi cairan di dalam labu yang berputar memengaruhi distribusi panas dan pembentukan lapisan film tipis, yang menjadi mekanisme utama perpindahan panas pada RVE. Fenomena ini sesuai dengan hasil Zhao et al. (2024), di mana peningkatan ketebalan film

atau berkurangnya luas kontak antara fluida dan dinding kaca dapat menurunkan koefisien perpindahan panas total. Akibatnya, peneliti memperoleh waktu evaporasi secara eksperimental yang lebih panjang dibandingkan nilai perhitungan ideal. Jika hasil pengamatan divisualisasikan dalam bentuk grafik (Gambar 3), terlihat bahwa waktu evaporasi cenderung konstan pada kisaran 1080–1200 detik, menunjukkan kestabilan operasi sistem pada kondisi yang ditetapkan.

3.2. Laju Pengurangan Massa

Tabel 2 menunjukkan hasil pengukuran laju pengurangan massa larutan pada proses evaporasi dengan variasi suhu kondensor. Nilai laju pengurangan massa dihitung berdasarkan perubahan massa larutan per satuan waktu selama proses penguapan berlangsung. Hasil pengukuran konsumsi energi listrik total selama proses ekstraksi ditampilkan pada Tabel 3. Peneliti melakukan pengukuran secara eksperimen karena hasil analisis non-dimensional tidak menunjukkan hubungan fungsional yang signifikan antara konsumsi energi dan variabel proses.

Tabel 2. Hasil pengukuran laju pengurangan massa

Replikasi	$\dot{m}_e$ (g/min)		
	Kondensor 23 °C	Kondensor 30 °C	Kondensor tidak didinginkan
1	3,28	2,90	2,14
2	4,22	2,80	2,27
3	3,78	3,28	2,41
4	3,87	3,04	2,17
5	3,75	3,06	2,24

Tabel 3. Hasil pengukuran konsumsi energi

Replikasi	E_{total} (kWh)		
	Kondensor 23 °C	Kondensor 30 °C	Kondensor tidak didinginkan
1	0,15	0,22	0,23
2	0,15	0,19	0,18
3	0,14	0,18	0,19
4	0,14	0,17	0,20
5	0,14	0,17	0,18

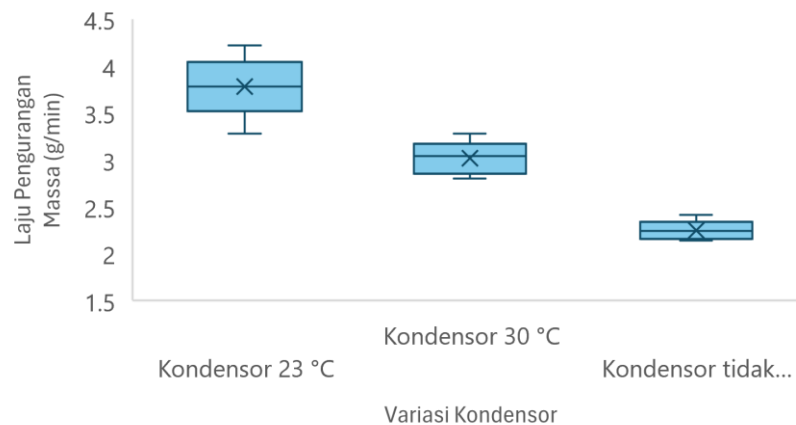
Peneliti memperoleh rata-rata laju pengurangan massa tertinggi sebesar 3,78 g/min pada suhu kondensor 23 °C, sedangkan nilai terendah terjadi ketika tidak menggunakan kondensor, yaitu 2,25 g/min. Hasil ini menunjukkan bahwa penurunan suhu kondensor meningkatkan efisiensi evaporasi karena perbedaan tekanan uap antara sisi evaporasi dan kondensasi menjadi lebih besar. Ketika suhu kondensor menurun, tekanan jenuh di sisi kondensasi berkurang sehingga gradien tekanan parsial meningkat dan mendorong laju penguapan cairan. Mekanisme ini sejalan dengan temuan Zhang and Zhou (2022) yang menunjukkan bahwa penurunan suhu dinding pada sistem film tipis mampu memperbesar driving force evaporasi serta meningkatkan koefisien perpindahan panas lokal.

Peningkatan efisiensi termal juga terlihat dari tren konsumsi energi pada Tabel 3. Kondensor yang lebih dingin menurunkan tekanan balik sehingga sistem memerlukan waktu operasi lebih singkat dan konsumsi energi listrik lebih rendah. Sun et al. (2024) menunjukkan bahwa sistem pemulihan panas berjenjang dengan pengendalian suhu kondensasi yang optimal dapat menghemat energi hingga 15 % melalui pengurangan beban kompresi uap.

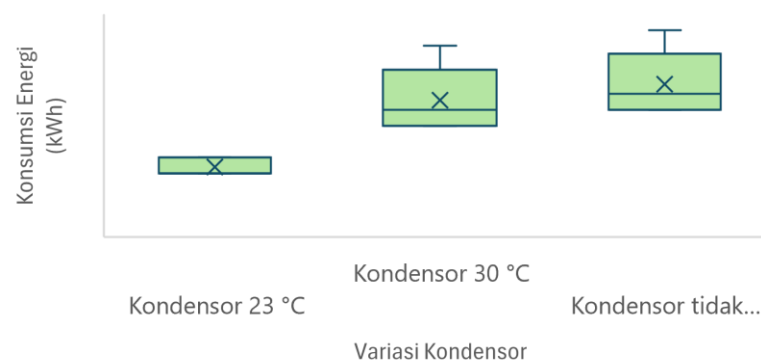
Sebaliknya, ketika kondensor tidak didinginkan, uap pelarut yang tidak segera terkondensasi menyebabkan peningkatan tekanan di ruang kondensasi. Tekanan ini menurunkan gradien tekanan antara cairan dan uap, memperlambat laju penguapan, serta meningkatkan

energi yang dibutuhkan untuk mempertahankan kondisi vakum. Menurut Zhang et al. (2022), efisiensi sistem termal menurun seiring dengan meningkatnya suhu kondensasi karena hilangnya kapasitas pendinginan dan rendahnya pemulihan panas laten.

Apabila data laju pengurangan massa dan konsumsi energi divisualisasikan (Gambar 4 dan Gambar 5), terlihat tren bahwa semakin rendah suhu kondensor, semakin besar laju penguapan dan semakin rendah konsumsi energi total. Fenomena ini menegaskan pentingnya pengendalian suhu kondensor dalam meningkatkan efisiensi termal sistem rotary vacuum evaporator.



Gambar 4. Perbandingan Laju Pengurangan Massa untuk tiap variasi kondensor



Gambar 5. Perbandingan Konsumsi Energi untuk tiap variasi kondensor

3.3. Analisis Pengaruh Suhu Kondensor

Pengaruh variasi suhu kondensor terhadap laju pengurangan massa dan konsumsi energi dapat dilihat pada Tabel 4. Nilai rerata menunjukkan bahwa penurunan suhu kondensor berpengaruh signifikan terhadap peningkatan laju penguapan dan efisiensi energi sistem RVE.

Tabel 4. Hasil pengukuran konsumsi energi

	Laju pengurangan massa (g/min)	Konsumsi energi (kWh)
Kondensor 23 °C	3,78	0,14
Kondensor 30 °C	3,02	0,19
Kondensor tidak didinginkan	2,24	0,20

Analisis pengaruh variasi temperatur air masuk kondensor diperkuat dengan menggunakan analisis secara statistik yaitu dengan menggunakan uji ANOVA. Hasil dari pengujian ANOVA untuk laju pengurangan massa menunjukkan bahwa nilai F hitung (56,4) lebih besar dari F tabel atau F crit (3,88), sehingga berdasarkan pada hipotesis penelitian yang telah

disebutkan sebelumnya, hipotesis H_0 ditolak dan hipotesis H_1 diterima yang memiliki makna bahwa pada penelitian ini temperatur kondensor berpengaruh pada laju pengurangan massa. Hasil dari pengujian ANOVA untuk konsumsi energi juga menunjukkan bahwa nilai F hitung (12,83) lebih besar dari F tabel atau F crit (3,88), sehingga berdasarkan pada hipotesis penelitian yang telah disebutkan sebelumnya, hipotesis H_0 ditolak dan hipotesis H_1 diterima yang memiliki makna bahwa pada penelitian ini temperatur kondensor berpengaruh pada konsumsi energi.

Tabel 5. Data analisis komparasi

Variasi	Replikasi	t (menit)	Energi Total (kWh)
Kondensor (23 °C)	1	20	0,15
	2	18	0,15
	3	20	0,14
	4	20	0,14
	5	20	0,14
Kondensor (30 °C)	1	26	0,22
	2	27	0,19
	3	23	0,18
	4	25	0,17
	5	25	0,17
Kondensor Tidak Didinginkan	1	36	0,23
	2	34	0,18
	3	32	0,19
	4	35	0,2
	5	34	0,18

Analisis selanjutnya adalah mempertimbangkan faktor waktu operasional atau waktu ekstraksi dalam meninjau pengaruh dari temperatur kondensor terhadap konsumsi energi. Berdasarkan data pada Tabel 5, waktu operasi menunjukkan hubungan terbalik dengan suhu kondensor. Pada suhu 23 °C, rata-rata waktu evaporasi hanya sekitar 19–20 menit, sedangkan pada 30 °C meningkat menjadi 24–26 menit, dan tanpa pendinginan mencapai 33–36 menit. Perbedaan durasi ini berkorelasi langsung dengan konsumsi energi total — semakin lama proses evaporasi, semakin besar energi yang diperlukan untuk mempertahankan vakum dan pemanasan. Fenomena ini memperkuat hasil ANOVA bahwa variasi suhu kondensor berpengaruh signifikan terhadap efisiensi proses.

Analisis daya rata-rata operasional pada Tabel 6 menunjukkan kecenderungan yang berbeda. Variasi tanpa pendinginan memiliki daya rata-rata operasional paling kecil ($\approx 0,34$ kW), sedangkan variasi 23 °C dan 30 °C masing-masing sekitar 0,44–0,50 kW. Namun, daya yang lebih rendah pada kondisi tanpa pendinginan tidak menunjukkan efisiensi lebih baik karena waktu operasi lebih lama. Secara energi kumulatif, variasi tanpa pendinginan tetap paling boros karena energi diakumulasi selama durasi yang lebih panjang untuk laju penguapan yang lebih kecil. Dengan demikian, daya sesaat, durasi operasi, dan kapasitas perpindahan panas menentukan efisiensi sistem.

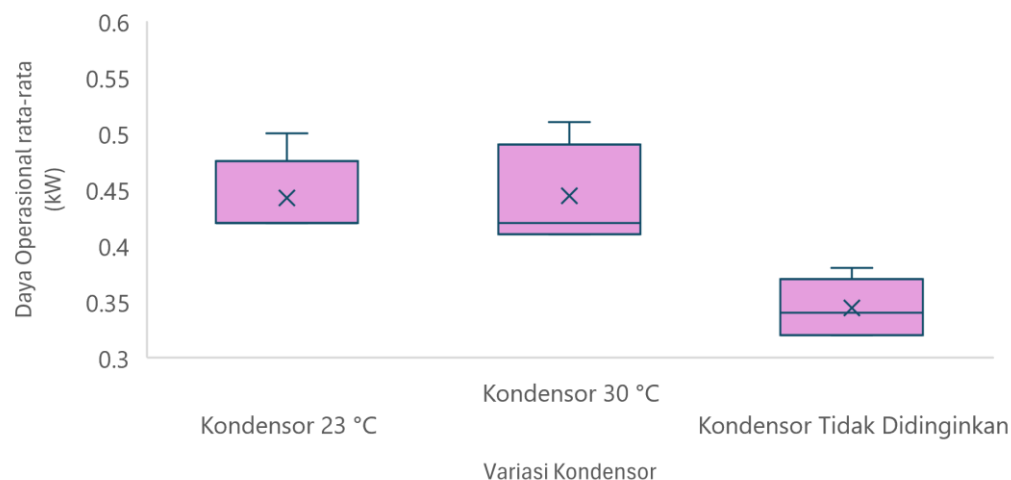
Secara termodinamika, fenomena tersebut dapat dijelaskan melalui perbedaan tekanan uap jenuh antara sisi evaporasi dan kondensasi. Semakin rendah suhu kondensor, tekanan uap jenuh menurun, sehingga gradien tekanan meningkat dan mendorong percepatan penguapan. Efek ini juga memperbesar driving force perpindahan panas pada antarmuka cair-uap. Hasil simulasi numerik oleh Wang et al. (2021) menunjukkan bahwa penurunan suhu dinding kondensasi dapat meningkatkan koefisien perpindahan panas film tipis hingga 20 %. Selain itu, Li

et al. (2019) menunjukkan bahwa kenaikan suhu kondensasi menurunkan efisiensi termal karena berkurangnya gradien temperatur dan peningkatan tekanan balik yang menghambat proses kondensasi. Kondensor dingin menurunkan back pressure dan memperpendek waktu operasi, sehingga konsumsi energi total lebih kecil.

Tabel 6. Daya operasional untuk masing-masing variasi

Replikasi	Daya rata-rata operasional (kW)		
	Kondensor 23 °C	Kondensor 30 °C	Kondensor Tidak Didinginkan
1	0,45	0,51	0,38
2	0,50	0,42	0,32
3	0,42	0,47	0,36
4	0,42	0,41	0,34
5	0,42	0,41	0,32

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pengendalian suhu kondensor 23 °C memberikan keseimbangan terbaik antara daya, waktu, dan energi total. Suhu ini menghasilkan laju penguapan tertinggi, waktu operasi terpendek, serta konsumsi energi terendah sehingga menjadi titik operasi paling efisien bagi sistem RVE.



Gambar 6. Distribusi daya operasional rata-rata pada variasi suhu kondensor

Gambar 6 memperlihatkan distribusi daya operasional rata-rata pada tiga variasi suhu kondensor. Kondensor bersuhu 23 °C dan 30 °C menunjukkan daya rata-rata yang hampir sama, masing-masing berada pada kisaran 0,44–0,50 kW. Sebaliknya, variasi tanpa pendinginan memiliki daya rata-rata paling rendah (sekitar 0,34 kW). Nilai daya yang lebih kecil pada kondisi tanpa pendinginan tidak berarti sistem lebih efisien, karena waktu operasi pada kondisi ini jauh lebih lama. Sebaliknya, pada suhu 23 °C, meskipun daya sesaat lebih besar, waktu proses yang jauh lebih singkat menghasilkan konsumsi energi total terendah. Fenomena ini menunjukkan bahwa efisiensi sistem tidak hanya bergantung pada daya listrik sesaat, tetapi juga pada durasi operasi dan efektivitas perpindahan panas. Kondensor 23 °C menghasilkan kombinasi paling optimal antara kapasitas pemanasan dan waktu kerja, sehingga menjadi titik operasi paling efisien bagi sistem *rotary vacuum evaporator*.

4. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa suhu kondensor berpengaruh signifikan terhadap kinerja *rotary vacuum evaporator* (RVE) pada proses ekstraksi meniran (*Phyllanthus niruri*). Rata-

rata waktu evaporasi yang dibutuhkan oleh larutan meniran dan etanol adalah sekitar 1176 detik. Kondensor dengan suhu 23 °C menghasilkan laju pengurangan massa tertinggi (3,78 g/menit) dan konsumsi energi terendah (0,14 kWh), dibandingkan dengan 30 °C (3,02 g/menit; 0,19 kWh) dan tanpa pendinginan (2,24 g/menit; 0,20 kWh).

Uji statistik ANOVA pada tingkat kepercayaan 95% menunjukkan bahwa suhu kondensor memiliki pengaruh yang signifikan terhadap laju pengurangan massa ($F_{hitung} = 56,4 > F_{tabel} = 3,88$) maupun konsumsi energi ($F_{hitung} = 12,83 > F_{tabel} = 3,88$). Secara termodinamika, hal ini disebabkan oleh penurunan tekanan uap jenuh pada suhu kondensor yang lebih rendah, yang memperbesar driving force penguapan dan meningkatkan efisiensi perpindahan panas.

Selain itu, suhu kondensor berpengaruh terhadap kualitas ekstrak. Kondensor pada suhu 23 °C menghasilkan kandungan *flavonoid* tertinggi (11,9 mg/mL), sedangkan kondisi tanpa kondensor menghasilkan nilai jauh lebih rendah (2,92 mg/mL). Hal ini menunjukkan bahwa efisiensi termal berperan penting dalam mempertahankan senyawa bioaktif selama evaporasi.

Secara praktis, hasil penelitian ini dapat menjadi dasar pengembangan sistem RVE hemat energi untuk industri herbal skala kecil dan menengah. Implementasi pengendalian suhu kondensor sekitar 23 °C direkomendasikan untuk memperoleh keseimbangan optimal antara efisiensi energi, waktu proses, dan kualitas ekstrak. Ke depan, penelitian dapat dikembangkan pada integrasi sistem pendingin cerdas berbasis mikrokontroler serta analisis ekonomi energi untuk skala industri yang lebih luas.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada UPPM Politeknik Internasional Tamansiswa Mojokerto.

Daftar Pustaka

- Cetinkaya, Ahmet, Seyda Yayla, M. Mesud Hurkul, and Sibel A. Ozkan. 2025. "The Sample Preparation Techniques and Their Application in the Extraction of Bioactive Compounds from Medicinal Plants." *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, May 19, 1–36. <https://doi.org/10.1080/10408347.2025.2503437>.
- Chatterjee, S., G. Sugilal, and S.V. Prabhu. 2019. "Heat Transfer in a Partially Filled Rotary Evaporator." *International Journal of Thermal Sciences* 142 (August): 407–21. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2019.04.033>.
- H. Al-Hassani, Ahmed, and Alaa R. Al-Badri. 2021. "Effects of Evaporator and Condenser Temperatures on the Performance of a Chiller System With a Variable Speed Compressor." *Engineering and Technology Journal* 39 (1A): 45–55. <https://doi.org/10.30684/etj.v39i1A.1647>.
- Kadir, Dler H. 2021. "Statistical Evaluation of Main Extraction Parameters in Twenty Plant Extracts for Obtaining Their Optimum Total Phenolic Content and Its Relation to Antioxidant and Antibacterial Activities." *Food Science & Nutrition* 9 (7): 3491–99. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2288>.
- Kulikova, Nataliya, Antonina Chernobrovina, Natalia Roeva, and Olga Popova. 2023. "Evaporation as a Method for Obtaining Plant Concentrates." *Food Processing: Techniques and Technology*, June 23, 335–46. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-2-2438>.
- Le, Violetta, Anna Stepanova, Arina Shevel, Timothy Larichev, and Sergey Luzyanin. 2025. "Factors Affecting Extraction of Bioactive Substances from Plant Cell Cultures." *Food Processing: Techniques and Technology*, July 1, 439–53. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-2-2567>.

- Lefebvre, Thibault, Emilie Destandau, and Eric Lesellier. 2021. "Selective Extraction of Bioactive Compounds from Plants Using Recent Extraction Techniques: A Review." *Journal of Chromatography A* 1635 (January): 461770. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2020.461770>.
- Lezoul, Nour El Houda, Mohamed Belkadi, Fariborz Habibi, and Fabián Guillén. 2020. "Extraction Processes with Several Solvents on Total Bioactive Compounds in Different Organs of Three Medicinal Plants." *Molecules* 25 (20): 4672. <https://doi.org/10.3390/molecules25204672>.
- Makarov, A., A. Khodos, M. Kirienko, and M. Senchuk. 2022. "Energy-Efficient Vacuum Evaporation Units for Concentration in the Dairy Industry." *Ventilation, Illumination and Heat Gas Supply* 43 (December): 13–26. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2022.43.13-26>.
- Mazaraie, Ayuob, Seyed Mohsen Mousavi-Nik, and Leila fahmideh. 2018. "Assessments of Phenolic, Flavonoid and Antioxidant Activity of Aqueous, Alcoholic, Methanol and Acetone Extracts of Thirteen Medicinal Plants." *Nova Biologica Reperta* 4 (4): 299–309. <https://doi.org/10.29252/nbr.4.4.299>.
- Mohamad Said, Khairul Anwar, and Mohamed Afizal Mohamed Amin. 2016. "Overview on the Response Surface Methodology (RSM) in Extraction Processes." *Journal of Applied Science & Process Engineering* 2 (1). <https://doi.org/10.33736/jaspe.161.2015>.
- Nechyporenko, Dmytro, Tatiana Novozhilova, Antonina Sakun, and Eugenia Ponomarenko. 2024. "Ways to Reduce Energy Consumption in The Evaporation Process of Solutions in Evaporation Apparatus." *Bulletin of the National Technical University «KhPI» Series: New Solutions in Modern Technologies*, no. 1(19) (April): 58–64. <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2024.01.08>.
- Ng, Zhi Xiang, Siti Najia Samsuri, and Phaik Har Yong. 2020. "The Antioxidant Index and Chemometric Analysis of Tannin, Flavonoid, and Total Phenolic Extracted from Medicinal Plant Foods with the Solvents of Different Polarities." *Journal of Food Processing and Preservation* 44 (9). <https://doi.org/10.1111/jfpp.14680>.
- Pogorzelska-Nowicka, Ewelina, Monika Hanula, and Grzegorz Pogorzelski. 2024. "Extraction of Polyphenols and Essential Oils from Herbs with Green Extraction Methods – An Insightful Review." *Food Chemistry* 460 (December): 140456. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.140456>.
- Said, Arshe, and Marjatta Louhi-Kultanen. 2019. "Simulation and Empirical Studies of Solvent Evaporation Rates in Vacuum Evaporation Crystallization." *Chemical Engineering & Technology* 42 (7): 1452–57. <https://doi.org/10.1002/ceat.201800708>.
- Smirnov, H. F., A. V. Zykov, and D. N. Reznichenko. 2017. "The Determination of Energy Source Optimal Parameters for Vacuum Evaporation." *Scientific Works* 80 (1). <https://doi.org/10.15673/swonaft.v80i1.236>.
- Sun, Dahan, Cong Wang, Zekuan Liu, Jiang Qin, and Zhongyan Liu. 2024. "Performance Analysis of a New Cascade Waste Heat Recovery System With a Wider Range of Applications." *Journal of Thermal Science and Engineering Applications* 16 (8): 081007. <https://doi.org/10.1115/1.4065492>.
- Uwineza, Pascaline Aimee, and Agnieszka Waśkiewicz. 2020. "Recent Advances in Supercritical Fluid Extraction of Natural Bioactive Compounds from Natural Plant Materials." *Molecules* 25 (17): 3847. <https://doi.org/10.3390/molecules25173847>.
- Wang, Long, Ying Liu, Fan Pu, Wen Zhang, and Zhongmu Zhou. 2018. "Effect of Rotary Evaporator Water Bath Temperature on Recovery Rate of Phthalate Esters." *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 101 (6): 810–13. <https://doi.org/10.1007/s00128-018-2440-3>.

- Yahaya, M. N., Mohamad Razlan, Z., Eswanto, E., Maruyama, N. ., Abdul Rahman, A., Yahya, M. N. R., ... Rani, M. F. H. . (2025). Analysis of Temperature and Relative Humidity Distributions in a Dental Treatment Room at a Government Health Clinic in Malaysia. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 127(1), 1–19. <https://doi.org/10.37934/arfmts.127.1.119>
- Zhang, Huanhao, and Yasu Zhou. 2022. “Effects of Tube Shape on the Distribution of Film Thickness and Heat Transfer Performance in Falling Film Evaporation.” *Heat and Mass Transfer* 58 (9): 1533–43. <https://doi.org/10.1007/s00231-022-03196-0>.
- Zhang, Le, Huixing Zhai, Jiayuan He, Fan Yang, and Suilin Wang. 2022. “Application of Exergy Analysis in Flue Gas Condensation Waste Heat Recovery System Evaluation.” *Energies* 15 (20): 7525. <https://doi.org/10.3390/en15207525>.
- Zhao, H., R. Poole, and Z. Zhou. 2024. “Rate-Limiting Factors in Thin-Film Evaporative Heat Transfer Processes.” *International Journal of Heat and Mass Transfer* 228 (August): 125629. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125629>.