

Sistem Pendingin Kondenser Ekstraktor Soxhlet Menggunakan Sistem Refrigerasi Kompresi Uap

1st Muhammad Dyki Adetyan
Fakultas Teknik Elektro
Telkom University
Bandung, Indonesia

dykiadetyan@student.telkomuniversity.ac.id

2nd Tri Ayodha Ajiwiguna S.T.,
M.Eng., Ph.D.
Fakultas Teknik Elektro
Telkom University
Bandung, Indonesia

triayodha@telkomuniversity.ac.id

3rd Dr.Eng. Indra Wahyudhin Fathona
S.Si., M.Si.
Fakultas Teknik Elektro
Telkom University
Bandung, Indonesia

indrafathonah@telkomuniversity.ac.id

Abstrak — Penelitian ini membahas perancangan dan implementasi dari sistem pendingin pada kondensor ekstraktor Soxhlet menggunakan Sistem Refrigerasi Kompresi Uap (SRKU) dengan refrigeran R-134a. Sistem ini dirancang untuk menjaga suhu air pendingin pada SRKU supaya tetap rendah dan stabil sehingga proses kondensasi pelarut berlangsung efektif. Komponen utama yang digunakan meliputi kompresor, kondensor, katup ekspansi, dan evaporator yang membentuk siklus tertutup. Air yang telah didinginkan pada evaporator dialirkan ke kondensor Soxhlet untuk membantu mengembunkan uap pelarut kembali menjadi cair. Pengujian ini dilakukan dengan variasi suhu, laju aliran, konsumsi energi listrik, serta nilai Coefficient of Performance (COP) untuk mengevaluasi performa dari sistem pendingin yang digunakan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem mampu bekerja otomatis sesuai setpoint dengan bantuan thermostat STC-1000, menghasilkan pendinginan efisien dengan konsumsi energi rendah. Dengan performa yang cukup stabil dan hemat energi, sistem pendingin SRKU dinilai sesuai untuk mendukung proses ekstraksi Soxhlet secara kontinu dan dapat dijadikan referensi untuk pengembangan teknologi pendingin hemat energi di masa mendatang.

Kata kunci— COP, Konsumsi energi, Refrigerasi, Soxhlet, SRKU.

I. PENDAHULUAN

Sistem pendingin memiliki peranan yang penting dalam proses ekstraksi Soxhlet, khususnya pada tahap kondensasi pelarut. Kondensor yang bekerja optimal akan memastikan uap pelarut mengembun kembali menjadi cairan sehingga dapat digunakan ulang dalam siklus ekstraksi. Pada pendinginan konvensional seperti menggunakan es batu, suhu dingin yang dihasilkan hanya dapat bertahan selama beberapa jam, setelah itu suhu akan naik kembali mendekati suhu lingkungan. Hal ini dapat menurunkan efisiensi ekstraksi dan meningkatnya kehilangan pelarut.

Sistem Refrigerasi Kompresi Uap (SRKU) merupakan salah satu solusi yang dapat menjaga suhu pendingin secara stabil dalam waktu lama. Keunggulan dari SRKU antara lain efisiensi pendinginan yang tinggi, kontrol otomatis suhu menggunakan thermostat, dan kemampuan bekerja secara terus-menerus tanpa adanya penambahan media pendingin

manual. Tujuan dari penelitian ini yaitu, merancang dan mengimplementasikan SRKU untuk mendinginkan kondensor Soxhlet, serta mengevaluasi kinerja dari sistem melalui parameter suhu, laju aliran, konsumsi energi, dan Coefficient of Performance (COP).

II. KAJIAN TEORI

Sistem Refrigerasi Kompresi Uap (SRKU) bekerja berdasarkan siklus termodinamika yang melibatkan empat komponen utama: kompresor, kondensor, katup ekspansi, dan evaporator. Proses ini dimulai dengan kompresi refrigeran di kompresor sehingga tekanan dan suhu meningkat. Selanjutnya refrigeran mengalir ke kondensor untuk melepaskan panas dan berubah menjadi cair. Setelah melewati katup ekspansi, tekanan dan suhu turun, lalu masuk ke evaporator untuk menyerap panas dari media pendingin. Kemudian, ekstraktor Soxhlet bekerja dengan memanaskan pelarut hingga menguap, mengkonsentrasikannya di kondensor Soxhlet, lalu meneteskan kembali ke bahan padat untuk melarutkan senyawa yang diinginkan. Proses berlangsung berulang hingga ekstraksi selesai.

III. METODE

Penelitian ini dilaksanakan melalui tiga tahapan utama: perancangan sistem, perakitan, dan pengujian kinerja.

Tahap pertama adalah perancangan sistem yang dimulai dari pemilihan komponen berdasarkan kapasitas pendinginan yang dibutuhkan untuk menjaga suhu air pada kondensor Soxhlet. Kompresor tipe QD91H dipilih karena memiliki kapasitas 1/4 PK. Kondensor yang digunakan merupakan tipe berpendingin udara dengan kipas, sedangkan evaporator menggunakan pipa tembaga yang ditempatkan dalam cold box.

Tahap kedua adalah perakitan sistem. Semua komponen dihubungkan menggunakan pipa tembaga dan selang untuk mengalirkan refrigeran dan air pendingin. Katup ekspansi tipe kapiler dipasang untuk mengatur aliran refrigeran, sementara pompa mengalirkan air dari evaporator menuju kondensor Soxhlet. Sistem dikendalikan oleh thermostat digital STC-1000 yang memutuskan dan menghubungkan daya kompresor berdasarkan suhu air pendingin yang terukur.

Tahap ketiga adalah pengujian kinerja sistem, yang dilakukan pada lima setpoint suhu (3–6°C, 7–10°C, 11–14°C, 15–18°C, dan 19–22°C) dan beberapa variasi laju aliran yaitu 2, 2.5, dan 3 LPM. Adapun beberapa parameter yang diukur seperti : Konsumsi Energi SRKU, Laju Produksi Aliran Kondensat, nilai *Specific Energy Consumption* (SEC), kapasitas pendingin rata-rata, konsumsi daya rata rata, dan juga COP.

A. Konsumsi Energi

Untuk mencari konsumsi energi SRKU, dapat menggunakan persamaan berikut.

$$\text{Konsumsi Energi} : \text{Energi Akhir} - \text{Energi Awal} \quad (1)$$

Dalam pengujian Soxhlet yang telah dilakukan, energi diukur menggunakan wattmeter dengan satuan kWh. Pengukuran energi dimulai dengan mencatat nilai awal saat pengujian dimulai, kemudian setiap 5 menit energi dicatat kembali untuk mengetahui jumlah energi yang dihasilkan (dalam kWh). Waktu pengujian Soxhlet bervariasi. Setelah timbel (tabung reaktor) terisi penuh dan tetesan yang terkumpul jatuh ke labu didih, pengujian Soxhlet dinyatakan selesai, dan data terakhir pun dicatat. Selisih antara energi awal dan energi akhir digunakan untuk menentukan energi yang dikonsumsi oleh sistem.

B. Laju Produksi Aliran Kondensat

Untuk mencari Laju Produksi Aliran Kondensat, dapat menggunakan persamaan berikut.

$$\dot{V} = \frac{V}{t} \quad (2)$$

Keterangan:

$\dot{V}$: Laju Produksi Aliran kondensat ($\frac{ml}{s}$)

V : Volume timbel (150 ml)

t : Waktu dalam satu siklus (s)

C. SEC

Untuk mencari nilai SEC, dapat menggunakan persamaan berikut.

$$SEC = \frac{\text{Konsumsi Energi SRKU}}{\text{Produksi Kondensat}} \quad (3)$$

Keterangan :

SEC : $kWh/Liter$

$\text{Konsumsi Energi SRKU}$: (kWh)

$\text{Produksi Kondensat}$: Liter

D. Kapasitas Pendingin Rata-Rata

Untuk mencari Kapasitas Pendingin Rata-Rata, dapat menggunakan persamaan berikut.

$$Q = \dot{m} \cdot C \cdot \Delta T (T_{out} - T_{in}) \quad (4)$$

Keterangan:

$\dot{m}$: Laju aliran massa ($\frac{kg}{s}$)

C : Kalor Jenis air ($\frac{J}{kg \cdot ^\circ C}$)

ΔT : Perbedaan suhu ($^\circ C$)

T_{out} : Suhu keluar kondensor soxhlet $^\circ C$

T_{in} : Suhu masuk kondensor soxhlet $^\circ C$

E. Konsumsi Daya Rata-Rata

Untuk mencari Konsumsi Daya Rata-Rata dapat menggunakan persamaan berikut.

$$P_{avg} = \frac{W}{t} \quad (5)$$

Keterangan:

P_{avg} : Daya rata – rata per satuan waktu (kW)

W : Energi SRKU (kWh)

t : Waktu selama 1 siklus (h)

F. COP

Untuk mencari nilai COP dapat menggunakan persamaan berikut.

$$COP = \frac{P_{kW}}{P_{avg}} \quad (6)$$

Keterangan:

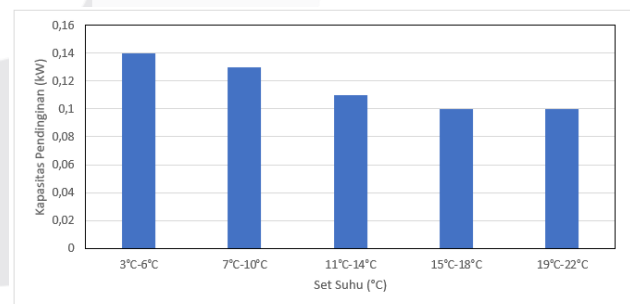
P_{kW} : Laju Penyerapan Panas (kW)

P_{avg} : Konsumsi Daya Rata – rata (kW)

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah dilakukan nya pengujian dan pengambilan data menggunakan heater maupun Soxhlet, didapatkan hasil data berikut.

A. Hasil Nilai Kapasitas Pendinginan terhadap Suhu

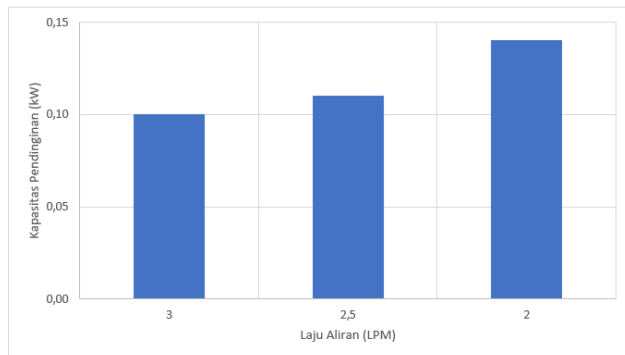


Gambar 1 Grafik Kapasitas Pendinginan Rata-Rata terhadap Suhu

Pada grafik di atas terlihat bahwa ketika suhu set poin dinaikkan, kapasitas pendinginan rata-rata mengalami penurunan. Hal ini disebabkan oleh semakin kecilnya kebutuhan pendinginan pada suhu target yang lebih tinggi, di mana sistem hanya perlu membuang panas dalam jumlah yang lebih sedikit untuk mencapai suhu tersebut. Akibatnya, energi yang diserap oleh air juga menjadi lebih rendah. Selain itu, pada suhu target yang lebih tinggi, waktu kerja kompresor menjadi lebih singkat karena perbedaan suhu antara air dan media pendingin lebih kecil. Kondisi ini mengurangi laju

perpindahan panas, sehingga kapasitas pendinginan total yang dihasilkan juga berkurang.

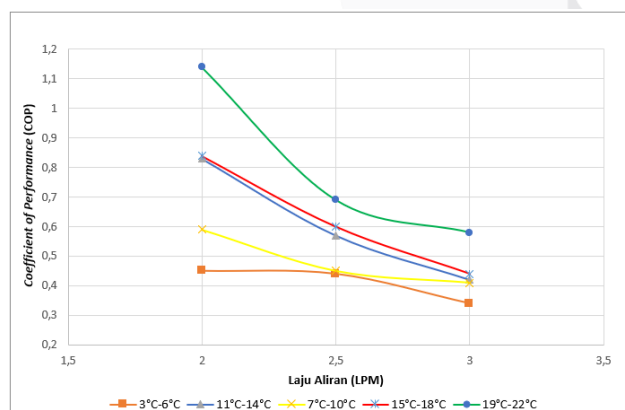
B. Hasil Nilai Kapasitas Pendingin terhadap Laju Aliran



Gambar 2 Grafik Kapasitas Pendingin Rata-Rata terhadap Laju Aliran

Pengamatan terhadap kapasitas pendinginan rata-rata menunjukkan bahwa nilainya cenderung menurun seiring dengan meningkatnya laju aliran air. Kondisi ini terjadi karena peningkatan laju aliran menyebabkan penurunan selisih suhu (ΔT) antara air masuk dan air keluar. Air yang mengalir lebih cepat memiliki waktu kontak yang lebih singkat dengan permukaan evaporator, sehingga proses penyerapan panas tidak berlangsung secara optimal. Akibatnya, energi panas yang diserap menjadi lebih sedikit, ΔT berkurang, dan secara langsung menurunkan nilai kapasitas pendinginan rata-rata (Q). Selain itu, laju aliran yang tinggi juga dapat mengurangi efisiensi perpindahan panas pada permukaan evaporator, sehingga performa pendinginan sistem tidak maksimal.

C. Hasil COP

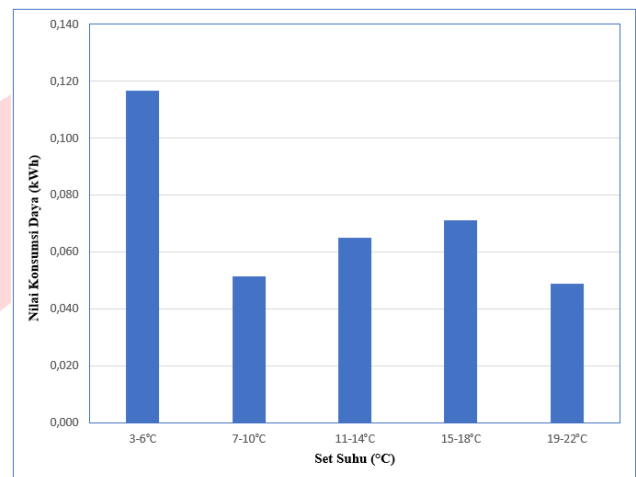


Gambar 3 Grafik COP

Pengujian SRKU pada rentang suhu 3–6°C hingga 19–22°C menunjukkan bahwa **Coefficient of Performance (COP)** dipengaruhi oleh laju aliran air, perbedaan suhu (ΔT), dan konsumsi energi listrik dari kompresor, pompa, serta fan kondensor. Laju aliran dan ΔT berperan langsung terhadap kapasitas pendinginan (Q), di mana aliran rendah menghasilkan ΔT lebih tinggi karena waktu kontak air

dengan permukaan dingin lebih lama, sedangkan aliran tinggi menurunkan ΔT sehingga kapasitas pendinginan berkurang. Peningkatan set suhu juga menurunkan kapasitas pendinginan karena kebutuhan pembuangan panas semakin kecil, sementara konsumsi energi berkurang sehingga COP cenderung meningkat. Dari hasil pengujian, kapasitas pendinginan SRKU berada pada kisaran **100–140 watt**, cukup untuk mengimbangi daya pemanas Soxhlet sebesar **100 watt**, sehingga sistem pendingin ini layak diterapkan pada proses ekstraksi Soxhlet.

D. Hasil Total Konsumsi Energi Pengujian Soxhlet

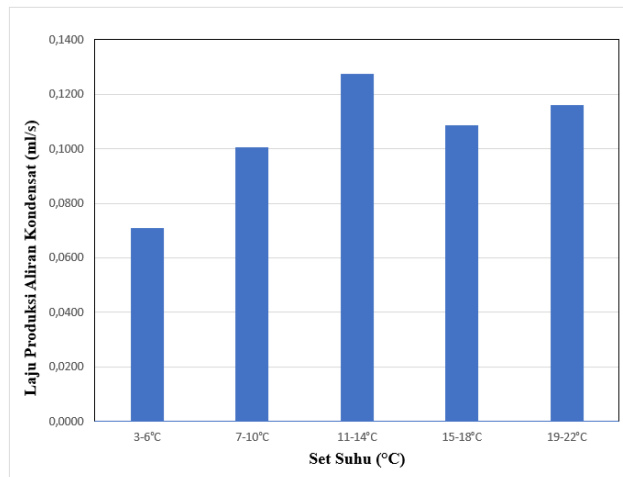


Gambar 4 Grafik Total Konsumsi Energi

Berdasarkan grafik total konsumsi energi, terlihat bahwa konsumsi energi sistem SRKU menurun seiring dengan meningkatnya set suhu operasi. Konsumsi energi ini berasal dari kompresor, fan pada kondensor dan pompa. Pada set suhu rendah (3–6°C), konsumsi energi mencapai nilai tertinggi. Hal ini disebabkan oleh beban pendinginan yang lebih besar, sehingga kompresor bekerja lebih lama dan lebih berat untuk mempertahankan suhu rendah. Waktu siklus kerja kompresor yang lebih panjang secara langsung meningkatkan total energi yang digunakan.

Sebaliknya, pada set suhu yang lebih tinggi seperti 19–22°C, konsumsi energi menurun. Penurunan ini terjadi karena perbedaan suhu antara lingkungan dan set suhu target semakin kecil, sehingga kebutuhan pendinginan berkurang dan kompresor dapat mencapai suhu yang diinginkan lebih cepat. Pada kondisi ini, waktu kerja kompresor menjadi lebih singkat, mengurangi energi yang dibutuhkan. Pola ini menunjukkan bahwa semakin tinggi set suhu, sistem SRKU bekerja lebih efisien dari sisi konsumsi energi.

E. Hasil Laju Produksi Aliran Kondensat



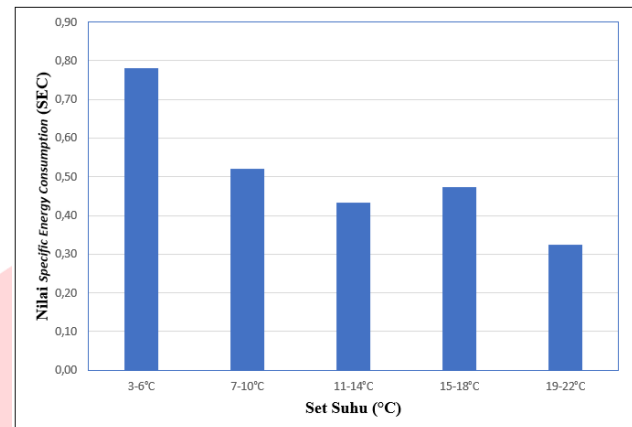
Gambar 5 Grafik Laju Produksi Aliran Kondensat

Pada suhu rendah, laju produksi kondensat pada kondensor soxhlet cenderung menurun akibat terjadinya *filmwise condensation* atau kondensasi berlapis. Berdasarkan buku *Heat Transfer* karya Yunus A. Çengel, fenomena ini merupakan salah satu mekanisme kondensasi di mana uap yang menyentuh permukaan padat yang dingin akan mengembun membentuk lapisan tipis cairan (film) yang menyelimuti permukaan tersebut. Lapisan kondensat ini tidak langsung menetes, melainkan menyebar secara merata di permukaan dan semakin menebal seiring bertambahnya kondensat dari proses berikutnya.

Dalam sistem kondensor soxhlet, kondensasi dapat terjadi melalui dua mekanisme utama. Pertama, *dropwise condensation*, yaitu uap mengembun langsung menjadi tetesan di permukaan pendingin, sehingga perpindahan panas berlangsung relatif cepat. Kedua, *filmwise condensation*, di mana uap membentuk lapisan film cairan yang melapisi dinding kondensor. Pada mekanisme kedua ini, lapisan cairan bertindak sebagai resistansi termal yang menghambat aliran panas dari uap ke dinding kondensor. Yang berarti semakin tebal lapisan kondensat, semakin rendah laju perpindahan panasnya.

Proses terjadinya *filmwise condensation* dimulai ketika uap etanol menyentuh permukaan dingin kondensor, sehingga terjadi pengembunan dan terbentuk cairan kondensat. Alih-alih langsung menetes seperti pada *dropwise condensation*, kondensat menyebar secara merata membentuk lapisan film baru di permukaan. Seiring waktu, lapisan ini semakin menebal akibat akumulasi kondensat berikutnya. Kondisi ini menyebabkan penurunan efisiensi perpindahan panas karena uap panas yang baru sulit mentransfer panasnya melalui lapisan kondensat tersebut. Akibatnya, laju kondensasi menurun, yang pada akhirnya menurunkan laju produksi kondensat pada suhu rendah.

F. Hasil SEC



Gambar 6 Grafik SEC

Berdasarkan dan grafik diatas, nilai *Specific Energy Consumption* (SEC) yang dinyatakan dalam kWh/L menunjukkan hubungan konsumsi energi sistem pendingin terhadap volume kondensat yang dihasilkan pada berbagai rentang suhu operasi. Nilai SEC tertinggi diperoleh pada set suhu 3°C–6°C sebesar 0,78 kWh/Liter, yang mengindikasikan efisiensi energi terendah. Hal ini disebabkan oleh kerja kompresor yang lebih berat dan durasi operasi yang lebih lama untuk mencapai suhu rendah, sehingga konsumsi energi meningkat, sementara volume kondensat yang dihasilkan relatif kecil akibat laju aliran yang rendah dan perpindahan panas yang kurang optimal. Kondisi ini menyebabkan perbandingan antara energi yang digunakan dan volume kondensat menjadi tidak efisien.

Sebaliknya, nilai SEC terendah terdapat pada set suhu 19°C–22°C sebesar 0,32 kWh/Liter, yang menandakan efisiensi energi terbaik. Pada rentang suhu menengah hingga tinggi (7°C–22°C), kompresor bekerja lebih ringan karena beban pendinginan lebih rendah, sehingga konsumsi energi berkurang. Selain itu, volume kondensat yang dihasilkan meningkat, sehingga nilai SEC menjadi lebih kecil. Variasi nilai SEC pada suhu menengah relatif stabil, menunjukkan bahwa sistem bekerja dengan performa yang lebih konsisten dan efisien dibandingkan saat beroperasi pada suhu rendah.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa **Sistem Pendingin Kondenser Ekstraktor Soxhlet** dengan Sistem Refrigerasi Kompresi Uap (SRKU) berhasil dirancang, diimplementasikan, dan diuji sehingga mampu memberikan performa pendinginan yang sesuai dengan kebutuhan proses ekstraksi Soxhlet. Sistem pendingin ini terbukti efektif dalam menjaga suhu air pendingin pada level yang rendah dan stabil, sehingga uap pelarut dapat terkondensasi secara optimal dan mendukung kelancaran proses ekstraksi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa performa sistem sangat dipengaruhi oleh tiga parameter

utama, yaitu laju aliran air, perbedaan suhu (ΔT), dan konsumsi energi. Laju aliran air yang lebih rendah cenderung menghasilkan ΔT yang lebih tinggi sehingga kapasitas pendinginan meningkat, sedangkan laju aliran yang lebih tinggi menyebabkan ΔT menurun karena waktu kontak dengan evaporator lebih singkat. Perbedaan kondisi ini secara langsung berpengaruh pada kapasitas pendinginan rata-rata (Q) yang dihasilkan oleh sistem.

Selain itu, konsumsi energi listrik yang berasal dari kompresor, pompa, dan kipas kondensor juga sangat dipengaruhi oleh suhu set point yang ditetapkan. Pada suhu rendah (3–6°C), beban pendinginan yang besar membuat kompresor bekerja lebih lama sehingga energi yang dikonsumsi tinggi, sementara pada suhu yang lebih tinggi (19–22°C), konsumsi energi berkurang karena waktu kerja kompresor lebih singkat. Dengan kondisi ini, nilai *Coefficient of Performance* (COP) justru meningkat pada suhu yang lebih tinggi karena energi yang digunakan lebih kecil dibandingkan kapasitas pendinginan yang dihasilkan. Secara keseluruhan, kapasitas pendinginan sistem SRKU yang diperoleh berkisar antara 100–140 watt, nilai yang cukup untuk mengimbangi daya pemanas Soxhlet sebesar 100 watt. Dengan demikian, sistem ini terbukti layak digunakan untuk menunjang proses ekstraksi Soxhlet yang memerlukan pendinginan kontinu dalam jangka waktu lama.

Dari penelitian ini dapat dipahami bahwa penerapan SRKU sebagai pendingin kondensor Soxhlet memberikan keuntungan dari sisi teknis maupun efisiensi energi. Sistem

yang dirancang tidak hanya dapat bekerja secara otomatis mengikuti set point suhu melalui pengendali termostat, tetapi juga mampu menjaga konsumsi energi tetap rendah. Oleh karena itu, sistem pendingin ini dapat dijadikan sebagai alternatif yang praktis, efisien, dan berkelanjutan untuk menggantikan metode pendinginan konvensional pada ekstraksi Soxhlet. Penelitian ini juga diharapkan dapat menjadi dasar bagi pengembangan sistem pendingin laboratorium yang lebih hemat energi dan dapat diaplikasikan secara luas pada proses ekstraksi dengan kebutuhan serupa.

REFERENSI

- [1] W. F. Stoecker and J. W. Jones, *Refrigeration and Air Conditioning*, 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1982.
- [2] R. J. Dossat and T. J. Horan, *Principles of Refrigeration*, 5th ed. New Jersey: Prentice Hall, 2002.
- [3] C. P. Arora, *Refrigeration and Air Conditioning*, 3rd ed. New Delhi: Tata McGraw-Hill Education, 2010.
- [4] ASHRAE, *ASHRAE Handbook – Refrigeration*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2020.
- [5] M. M. Rahman and M. T. Islam, “Optimization of COP in Vapor Compression Refrigeration Systems,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 142, pp. 460–470, 2018.
- [6] Y. A. Çengel, *Heat Transfer: A Practical Approach*, 2nd ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2003.