

Analisis Kinerja Sistem Pengering Ikan Berbasis *Waste Heat Recovery* Pada Mesin Es Balok

Agung Firmansyah¹, Nia Nuraeni Suryaman², Arifin Santosa³, Ahmad Rajani⁴

Email corresponding author: agungfrmnsyh41@gmail.com

^{1,2}Teknik Mesin, Universitas Widyatama, Jl. Cikutra No. 204A Bandung, 40126, Jawa Barat, Indonesia

^{3,4}Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) Jl. Sangkuriang, Dago, Bandung, 40135, Jawa Barat, Indonesia

Article history: Received: 27 Mei 2026 | Revised: 16 Juni 2026 | Accepted: 19 Juni 2026

Abstract. *This study analyzes the performance of a fish drying system utilizing condenser waste heat from an ice block machine through a waste heat recovery approach without additional external heaters. The research employed a quantitative experimental method by comparing a condenser - based drying system and conventional sun drying. The analysis focused on thermal characteristics, moisture reduction, drying performance, and energy consumption of the system. The condenser-based drying system produced more stable drying conditions with temperatures ranging from 31.17 - 40.87°C and relative humidity decreasing from 100% to 57%. Fish mass decreased from 1000 g to 410 g, indicating continuous moisture evaporation during the drying process. The system generated an average Specific Energy Consumption (SEC) value of 9.40 kWh/kg and a Specific Moisture Extraction Rate (SMER) value of 0.10 kg/kWh. The results indicate that condenser waste heat has potential as an alternative energy source for a more stable, controlled, and weather-independent fish drying process. However, further optimization of condenser performance and refrigeration system capacity is still required to improve heat transfer performance and energy efficiency of the drying system.*

Keywords - *Fish drying; waste heat recovery; condenser heat; heat pump drying; energy efficiency*

Abstrak. *Penelitian ini menganalisis performa sistem pengering ikan berbasis pemanfaatan panas buang kondensor mesin es balok melalui metode waste heat recovery tanpa pemanas tambahan eksternal. Metode penelitian menggunakan eksperimen kuantitatif dengan membandingkan sistem pengering berbasis panas kondensor dan pengeringan konvensional menggunakan sinar matahari langsung. Analisis penelitian difokuskan pada karakteristik termal, penurunan kadar air, performa pengeringan, dan konsumsi energi sistem. Sistem pengering berbasis panas kondensor menghasilkan kondisi pengeringan yang lebih stabil dengan temperatur berkisar antara 31,17 - 40,87°C dan relative humidity (RH) menurun dari 100% menjadi 57%. Massa ikan menurun dari 1000 gram menjadi 410 gram yang menunjukkan terjadinya evaporasi air secara kontinu selama proses pengeringan. Sistem menghasilkan nilai rata-rata Specific Energy Consumption (SEC) sebesar 9,40 kWh/kg dan Specific Moisture Extraction Rate (SMER) sebesar 0,10 kg/kWh. Hasil penelitian menunjukkan bahwa panas buang kondensor berpotensi digunakan sebagai sumber energi alternatif pada proses pengeringan ikan yang lebih stabil, terkontrol, dan tidak bergantung secara langsung terhadap kondisi cuaca. Namun, optimasi lebih lanjut terhadap performa kondensor dan kapasitas sistem refrigerasi masih diperlukan untuk meningkatkan performa perpindahan panas dan efisiensi energi sistem pengering.*

Kata Kunci - *Pengeringan ikan; waste heat recovery; panas kondensor; heat pump drying; efisiensi energi*

PENDAHULUAN

Produk hasil perikanan merupakan bahan pangan dengan kandungan air dan protein yang tinggi sehingga mudah mengalami kerusakan selama penyimpanan. Salah satu metode pengawetan yang umum digunakan adalah proses pengeringan untuk menurunkan kadar air bahan hingga mencapai batas aman penyimpanan sehingga aktivitas mikroorganisme dan proses pembusukan dapat ditekan [1][2]. Sebagian besar usaha pengolahan ikan skala kecil di Indonesia masih menggunakan metode pengeringan konvensional dengan memanfaatkan sinar matahari langsung. Metode ini memiliki biaya operasional rendah, namun sangat dipengaruhi oleh kondisi cuaca, intensitas radiasi matahari, temperatur lingkungan, dan kelembapan udara [3][4]. Ketidakstabilan kondisi lingkungan menyebabkan proses pengeringan berlangsung lebih lama dan menghasilkan kualitas produk yang tidak seragam.

Temperatur dan kelembapan relatif udara merupakan parameter penting yang mempengaruhi performa pengeringan. Temperatur yang lebih tinggi dapat meningkatkan proses evaporasi air dari bahan, sedangkan kelembapan relatif yang rendah meningkatkan kemampuan udara dalam menyerap uap air [5]. Oleh karena itu, berbagai sistem pengering modern dikembangkan untuk menghasilkan kondisi pengeringan yang lebih stabil dan terkontrol. Salah satu teknologi yang banyak dikembangkan adalah sistem *heat pump dryer* berbasis refrigerasi siklus

kompresi uap yang mampu menghasilkan temperatur dan kelembapan udara pengereng yang lebih stabil dibandingkan metode konvensional [6].

Perkembangan teknologi pengeringan juga mendorong pemanfaatan konsep *waste heat recovery* untuk meningkatkan efisiensi energi sistem. Salah satu potensi energi yang dapat dimanfaatkan adalah panas buang kondensor pada sistem refrigerasi yang pada kondisi normal dilepaskan langsung ke lingkungan [7][8]. Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa pemanfaatan panas kondensor mampu meningkatkan performa pengeringan dan mengurangi ketergantungan terhadap kondisi cuaca [9][10]. Selain itu, penerapan *waste heat recovery* dilaporkan mampu meningkatkan performa termal sistem dan mengurangi kebutuhan energi tambahan selama proses pengeringan [7][8].

Meskipun berbagai penelitian telah melaporkan pemanfaatan panas buang kondensor pada sistem pengering berbasis refrigerasi, sebagian besar sistem masih menggunakan pemanas tambahan *heater* untuk meningkatkan temperatur udara pengereng dan mempercepat proses evaporasi air. Penggunaan *heater* mampu meningkatkan performa pengeringan, namun menyebabkan konsumsi energi listrik sistem menjadi lebih tinggi [11]. Selain itu, penelitian mengenai *heat pump dryer* dan sistem pengering berbasis refrigerasi umumnya berfokus pada sistem yang dirancang khusus untuk proses pengeringan sehingga fungsi pendinginan dan pengeringan bekerja sebagai dua proses yang terpisah [6][12][13].

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa panas buang kondensor memiliki potensi untuk dimanfaatkan kembali sebagai sumber energi termal pada proses pengeringan. Yaakop [7] melaporkan pemanfaatan panas buang unit kondensasi sistem refrigerasi sebagai sumber panas pengereng, sedangkan Adepradana [10] memanfaatkan sistem *air conditioning* sebagai *heat pump* untuk proses pengeringan. Xu [8] juga menunjukkan bahwa pemanfaatan panas buang pada sistem *heat pump* dapat meningkatkan efisiensi energi dan performa termal sistem. Meskipun demikian, penelitian-penelitian tersebut masih berfokus pada peningkatan performa pengeringan atau optimasi sistem pengering secara khusus dan belum banyak mengkaji integrasi antara proses pendinginan dan proses pengeringan yang berlangsung secara simultan dalam satu sistem refrigerasi.

Di sektor perikanan, mesin es balok merupakan salah satu sistem refrigerasi yang beroperasi secara kontinu untuk memenuhi kebutuhan rantai dingin produk perikanan. Selama proses pembentukan es berlangsung, kondensor melepaskan energi panas ke lingkungan yang umumnya belum dimanfaatkan secara optimal. Padahal, energi panas tersebut berpotensi dimanfaatkan kembali sebagai sumber energi pengeringan melalui konsep *waste heat recovery* sehingga dapat meningkatkan efisiensi pemanfaatan energi pada sistem refrigerasi. Namun demikian, informasi mengenai karakteristik pengeringan ikan yang memanfaatkan panas buang kondensor mesin es balok pada kondisi operasional nyata masih sangat terbatas, khususnya terkait hubungan karakteristik termal ruang pengereng, penurunan kadar air bahan, dan performa energi sistem.

Berdasarkan kondisi tersebut, masih terdapat *research gap* terkait pemanfaatan panas buang kondensor mesin es balok sebagai sumber energi pengeringan tanpa pemanas tambahan eksternal pada sistem yang tetap menjalankan fungsi utama pembentukan es. Kajian mengenai integrasi proses pendinginan dan proses pengeringan dalam satu siklus refrigerasi yang beroperasi secara simultan masih terbatas dalam literatur, terutama pada aplikasi pengeringan ikan skala kecil yang memanfaatkan panas buang kondensor mesin es balok sebagai sumber energi utama pengeringan.

Penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa panas buang kondensor dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi termal pada proses pengeringan [7][8][10]. Namun, sebagian besar sistem masih menggunakan unit pengering yang dirancang secara khusus atau memerlukan sumber panas tambahan untuk meningkatkan temperatur pengeringan [10][11]. Selain itu, penelitian terdahulu umumnya berfokus pada peningkatan performa pengeringan tanpa mengintegrasikan fungsi pendinginan dan pengeringan dalam satu sistem refrigerasi yang beroperasi secara simultan [12][13].

Kebaruan penelitian ini terletak pada penerapan konsep *waste heat recovery* dengan memanfaatkan panas buang kondensor mesin es balok sebagai satu-satunya sumber energi termal untuk proses pengeringan ikan tanpa menggunakan *heater* tambahan. Berbeda dengan penelitian sebelumnya, sistem yang dikembangkan memungkinkan proses pembentukan es pada evaporator dan proses pengeringan ikan melalui panas kondensor berlangsung secara bersamaan dalam satu sistem refrigerasi yang sama. Selain itu, penelitian ini mengevaluasi kinerja sistem pada kondisi operasional nyata melalui analisis temperatur, *Relative Humidity* (RH), penurunan massa, *Moisture Content* (MC), *Moisture Ratio* (MR), *Drying Rate* (DR), konsumsi energi listrik, *Specific Energy Consumption* (SEC), dan *Specific Moisture Extraction Rate* (SMER) untuk menilai efektivitas pemanfaatan panas buang kondensor sebagai sumber energi alternatif pada proses pengeringan ikan. Pendekatan ini tidak hanya memanfaatkan energi panas yang sebelumnya terbuang ke lingkungan, tetapi juga meningkatkan efektivitas pemanfaatan energi melalui integrasi fungsi pendinginan dan pengeringan dalam satu sistem refrigerasi.

Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kinerja sistem pengering ikan berbasis pemanfaatan panas buang kondensor mesin es balok tanpa pemanas tambahan eksternal yang beroperasi secara simultan dengan proses pembentukan es. Evaluasi dilakukan melalui analisis karakteristik temperatur, *Relative Humidity* (RH), penurunan massa, *Moisture Content* (MC), *Moisture Ratio* (MR), *Drying Rate* (DR), konsumsi energi listrik, *Specific Energy Consumption* (SEC),

dan *Specific Moisture Extraction Rate* (SMER). Selain itu, penelitian ini bertujuan membandingkan performa sistem dengan metode pengeringan konvensional serta menilai potensi penerapan konsep *waste heat recovery* pada mesin es balok sebagai sumber energi alternatif untuk proses pengeringan ikan.

METODE

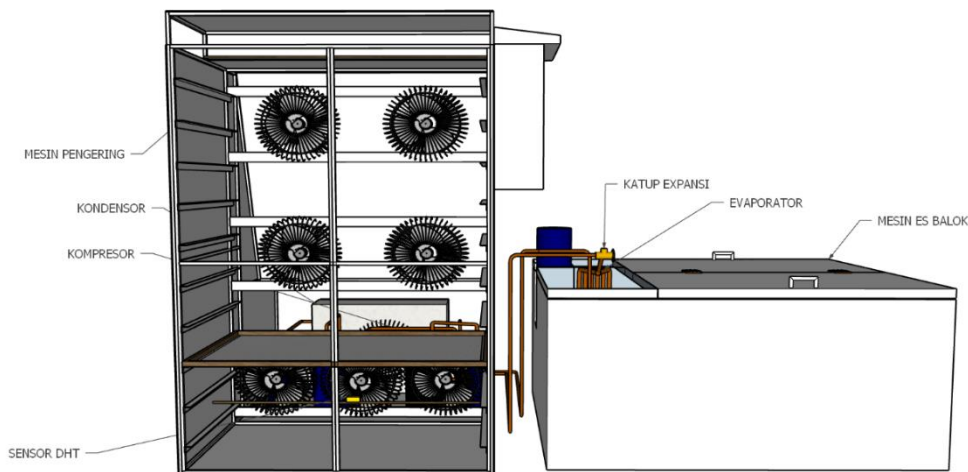
A. Sistem Pengering Berbasis Panas Kondensor

Sistem pengering yang digunakan pada penelitian ini merupakan sistem refrigerasi siklus kompresi uap yang terintegrasi dengan mesin pembuat es balok dan ruang pengering ikan. Sistem ini memanfaatkan panas buang dari kondensor sebagai sumber energi termal utama proses pengeringan melalui konsep *waste heat recovery*. Pada kondisi operasi normal, evaporator digunakan untuk menyerap panas dari larutan air garam pada proses pembentukan es balok, sedangkan panas yang dilepaskan oleh kondensor dimanfaatkan kembali sebagai media pemanas udara pada ruang pengering. Dengan demikian, sistem bekerja secara simultan untuk proses pendinginan dan pengeringan dalam satu siklus operasi.

Komponen utama sistem terdiri atas kompresor, kondensor, evaporator, katup ekspansi, ruang pengering, blower sirkulasi udara, dan tambahan sensor temperatur serta kelembapan tipe DHT22. Refrigeran yang keluar dari evaporator dalam kondisi bertekanan rendah dikompresi oleh kompresor sehingga temperatur dan tekanannya meningkat. Refrigeran panas selanjutnya mengalir menuju kondensor dan melepaskan energi panas ke udara di sekitar ruang pengering. Udara panas tersebut kemudian disirkulasikan ke dalam ruang pengering menggunakan blower untuk mempercepat proses evaporasi air dari ikan. Setelah melepaskan panas di kondensor, refrigeran melewati katup ekspansi untuk menurunkan tekanan dan temperaturnya sebelum kembali menuju evaporator untuk melanjutkan siklus refrigerasi [6].

Penggunaan sistem berbasis panas kondensor ini bertujuan meningkatkan efisiensi pemanfaatan energi dengan memanfaatkan panas yang sebelumnya terbuang ke lingkungan menjadi sumber energi pengering. Pendekatan *waste heat recovery* pada sistem refrigerasi dilaporkan mampu meningkatkan performa termal sistem dan mengurangi kebutuhan energi tambahan pada proses pengeringan [7][8]. Selain itu, sistem pengering berbasis refrigerasi mampu menghasilkan kondisi temperatur dan kelembapan yang lebih stabil dibandingkan metode pengeringan konvensional sehingga proses pengeringan berlangsung lebih efektif dan seragam [9].

Gambar 1 menunjukkan konfigurasi sistem pengering ikan berbasis pemanfaatan panas buang kondensor mesin es balok yang digunakan pada penelitian ini.



Gambar 1. Konfigurasi sistem pengering ikan berbasis pemanfaatan panas buang kondensor mesin es balok

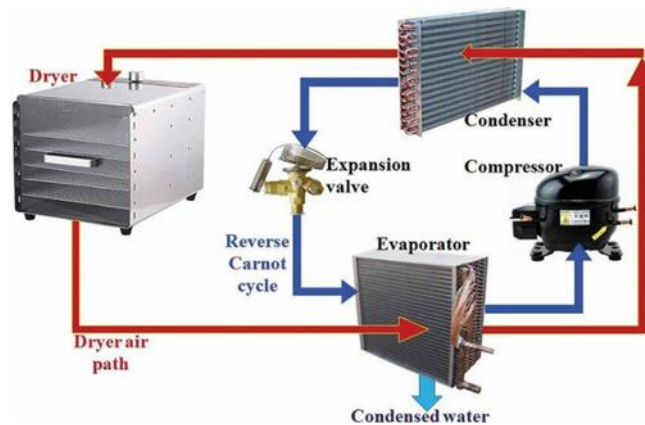
Pada ruang pengering dipasang beberapa sensor DHT22 untuk memantau distribusi temperatur dan kelembapan relatif pada beberapa titik pengukuran selama proses pengeringan berlangsung. Sistem juga dilengkapi blower untuk membantu distribusi udara panas agar penyebaran temperatur di dalam ruang pengering menjadi lebih merata. Pengambilan data temperatur dan kelembapan dilakukan secara berkala selama proses pengeringan untuk mengevaluasi karakteristik termal sistem serta hubungan antara temperatur, kelembapan relatif, dan laju penurunan kadar air ikan. Sistem pengering yang digunakan pada penelitian ini memanfaatkan panas buang kondensor mesin es balok sebagai sumber energi termal untuk proses pengeringan ikan. Sistem refrigerasi tetap menjalankan fungsi utamanya dalam proses pembentukan es, sedangkan panas yang dilepaskan oleh kondensor dimanfaatkan untuk memanaskan udara pengering. Spesifikasi utama sistem pengering yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Tabel Spesifikasi Sistem

NO	Parameter	Spesifikasi
1.	Kapasitas mesin es balok	200 kg
2.	Kapasitas pendinginan	1,58 kW (0,45 TR)
3.	Spesifikasi kompresor	<i>Kulthorn Kirby AW2464ZK, hermetic reciprocating compressor, refrigeran R404A, tegangan operasi 220–240 V, frekuensi 50 Hz, RLA 6,9 A, LRA 43 A, daya listrik 1280 W</i>
4.	Tipe kondensor	<i>Air-cooled finned tube condenser</i>
5.	Luas kondensor	0,2116 m ²
6.	Debit udara blower	1800 m ³ /h (0,50 m ³ /s)
7.	Volume ruang pengering	1,33 m ³

Berdasarkan spesifikasi pada Tabel 1, sistem pengering memanfaatkan panas buang kondensor dari mesin es balok sebagai sumber energi termal utama tanpa menggunakan heater tambahan. Sistem refrigerasi menggunakan kompresor hermetik tipe *Kulthorn Kirby AW2464ZK* dengan kapasitas pendinginan 1,58 kW (0,45 TR) dan refrigeran R404A. Kondensor yang digunakan bertipe *air-cooled finned tube condenser* dengan luas permukaan 0,2116 m² dan debit udara blower sebesar 1800 m³/h. Ruang pengering memiliki volume 1,33 m³ sehingga memungkinkan distribusi udara panas hasil pemanfaatan panas buang kondensor selama proses pengeringan berlangsung.

Selain konfigurasi fisik sistem, prinsip kerja siklus refrigerasi dan aliran panas pada sistem pengering ditunjukkan pada Gambar 2. Diagram tersebut memperlihatkan aliran refrigeran dari kompresor menuju kondensor, katup ekspansi, dan evaporator, serta pemanfaatan panas kondensor sebagai sumber panas pada ruang pengering [6].



Gambar 2. Diagram aliran refrigeran dan pemanfaatan panas kondensor pada sistem pengering ikan berbasis refrigerasi siklus kompresi uap.

Tabel 2. Alat dan bahan yang digunakan pada penelitian sistem pengering berbasis panas kondensor.

NO	Alat dan Bahan	Spesifikasi/Keterangan
1.	Sistem pengering berbasis kondensor	Refrigerasi siklus kompresi uap, refrigeran R404A, kompresor 220 - 240 V
2.	Ikan kapasan	Massa awal 1000 gram pada setiap pengujian
3.	Sensor DHT22	Rentang suhu -40°C sampai 80°C, akurasi ±0.5°C
4.	Data logger	Sistem perekaman otomatis
5.	Tenmars TM-750	Satuan pengukuran (W/m ²)
6.	Multi-function digital meter	Pengukuran tegangan, arus, daya, dan energi listrik
7.	Timbangan digital	Pengukuran massa bahan
8.	Stopwatch	Tipe digital

B. Prosedur Pengujian dan Pengolahan Data

Pengujian dilakukan dengan membandingkan metode pengeringan berbasis panas kondensor dan pengeringan konvensional menggunakan sinar matahari langsung. Selain parameter performa pengeringan, pengukuran intensitas radiasi matahari pada metode konvensional dilakukan untuk mengetahui pengaruh kondisi lingkungan terhadap karakteristik pengeringan selama pengujian berlangsung, sedangkan pada sistem berbasis panas kondensor dilakukan pengukuran temperatur, RH, konsumsi energi listrik, dan perubahan massa ikan selama pengeringan.

Bahan uji yang digunakan adalah ikan kapasan dengan massa awal sebesar 1000 gram pada setiap pengujian. Pengambilan data dilakukan mulai pukul 08.30 WIB hingga 13.30 WIB dengan interval pengukuran setiap 30 menit. Untuk meningkatkan validitas data, setiap pengujian dilakukan sebanyak tiga kali pengulangan dengan kondisi pengujian yang sama.

Pada sistem pengering berbasis panas kondensor, hasil pengujian dari tiga kali pengulangan diolah menggunakan nilai rata-rata karena karakteristik temperatur, RH, dan penurunan massa yang dihasilkan relatif stabil pada setiap pengujian. Data rata-rata tersebut kemudian digunakan untuk merepresentasikan performa sistem pengering pada grafik hasil pengujian.

Sementara itu, pada metode pengeringan konvensional, data hasil pengujian ditampilkan berdasarkan masing-masing hari pengujian tanpa menggunakan nilai rata-rata. Hal tersebut dilakukan karena kondisi lingkungan, intensitas radiasi matahari, temperatur, dan kelembapan udara pada setiap hari pengujian mengalami perubahan yang mempengaruhi karakteristik pengeringan. Data pengujian metode konvensional kemudian dibandingkan dengan hasil rata-rata sistem pengering berbasis panas kondensor untuk menunjukkan perbedaan stabilitas performa pengeringan antara kedua metode. Parameter yang dianalisis meliputi *Moisture Content* (MC), *Moisture Ratio* (MR), *Drying Rate* (DR), *Specific Energy Consumption* (SEC), dan *Specific Moisture Extraction Rate* (SMER).

C. Analisis Statistik

Data temperatur dan *Relative Humidity* (RH) dari metode pengering berbasis panas buang kondensor dan metode pengeringan konvensional dianalisis menggunakan *Paired Sample t-test* pada tingkat kepercayaan 95% ($\alpha = 0,05$). Uji ini digunakan untuk mengevaluasi signifikansi perbedaan kondisi udara pengering yang dihasilkan oleh kedua metode. Analisis dilakukan menggunakan data rata-rata temperatur dan RH pada setiap interval waktu pengamatan yang diperoleh dari tiga kali pengulangan pengujian.

Hipotesis nol (H_0) menyatakan bahwa tidak terdapat perbedaan yang signifikan antara metode pengering berbasis panas buang kondensor dan metode pengeringan konvensional. Hipotesis alternatif (H_1) menyatakan bahwa terdapat perbedaan yang signifikan antara kedua metode. Keputusan pengujian ditentukan berdasarkan nilai p-value, dimana H_0 ditolak apabila p-value $< 0,05$. Analisis statistik difokuskan pada temperatur dan RH karena kedua parameter tersebut merupakan variabel lingkungan utama yang secara langsung mempengaruhi karakteristik pengeringan.

1. *Moisture Content* (MC)

Moisture Content (MC) digunakan untuk menentukan kadar air bahan selama proses pengeringan berlangsung. Perhitungan dilakukan berdasarkan perubahan massa bahan dengan asumsi massa kering bahan bersifat konstan. Nilai kadar air basis basah dihitung menggunakan Persamaan (1) [14].

$$MC_{wb} = \frac{W_i - W_d}{W_i} \times 100\% \quad (1)$$

Dimana

MCwb = Kadar air basis basah (%)
Wi = Massa awal bahan (kg)
Wd = Massa akhir bahan (kg)

2. *Moisture ratio* (MR)

Moisture Ratio digunakan untuk menggambarkan perubahan kadar air bahan terhadap waktu selama proses pengeringan berlangsung. Nilai MR dihitung menggunakan Persamaan (2) [14].

$$MR = \frac{M_t}{M_o} \quad (2)$$

Dimana

MR = *Moisture ratio*
Mt = Kadar air pada waktu tertentu
Mo = Kadar air awal

3. Drying rate (DR)

Drying rate (DR) digunakan untuk mengetahui kecepatan sistem dalam menurunkan kadar air bahan selama proses pengeringan berlangsung. Nilai DR dihitung menggunakan Persamaan (3) [3][5].

$$DR = \frac{M_t - M_{t+\Delta t}}{\Delta t} \quad (3)$$

Dimana

- DR = Drying rate
- Mt = Massa bahan pada waktu tertentu (kg)
- Mt+▲t = Massa bahan pada waktu berikutnya (kg)
- ▲t = Interval waktu pengamatan (jam)

4. Specific Energy Consumption (SEC)

Specific Energy Consumption (SEC) digunakan untuk menunjukkan jumlah energi listrik yang dibutuhkan untuk menguapkan setiap satu kilogram air dari bahan selama proses pengeringan. Nilai (SEC) dihitung menggunakan Persamaan (4) [5][16].

$$SEC = \frac{E}{m_w} \quad (4)$$

Dimana

- SEC = Specific Energy Consumption (kWh/kg)
- E = Energi yang digunakan (kWh)
- Mw = Massa air yang diuapkan (kg)

5. Specific Moisture Extraction Rate (SMER)

Specific Moisture Extraction Rate (SMER) digunakan untuk mengevaluasi efisiensi energi sistem pengering berdasarkan rasio massa air yang diuapkan terhadap energi listrik yang digunakan selama proses pengeringan. Nilai (SMER) dihitung menggunakan Persamaan (5) [16][18].

$$SMER = \frac{m_w}{E} \quad (5)$$

Dimana

- SMER = Specific Moisture Extraction Rate (kg/kWh)
- Mw = Massa air yang diuapkan (kg)
- E = Energi yang digunakan (kWh)

Hasil pengolahan data selanjutnya disajikan dalam bentuk tabel dan grafik untuk menunjukkan hubungan antara temperatur ruang pengering, kelembapan relatif, penurunan massa ikan, konsumsi energi listrik, serta efisiensi energi sistem selama proses pengeringan berlangsung. Data hasil pengujian sistem berbasis panas kondensor kemudian dibandingkan dengan metode pengeringan konvensional untuk mengevaluasi efektivitas sistem pengering yang dikembangkan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian dilakukan untuk membandingkan performa sistem pengering berbasis panas kondensor dengan metode pengeringan konvensional menggunakan sinar matahari langsung. Analisis dilakukan berdasarkan karakteristik temperatur ruang pengering, kelembapan relatif (*relative humidity*), penurunan massa ikan, laju pengeringan, dan konsumsi energi selama proses pengeringan berlangsung.

Sistem pengering berbasis panas kondensor menghasilkan temperatur dan kelembapan relatif yang lebih stabil karena sumber panas diperoleh dari panas buang kondensor sistem refrigerasi yang bekerja secara kontinu. Kondisi tersebut mendukung proses evaporasi air berlangsung lebih konsisten selama proses pengeringan.

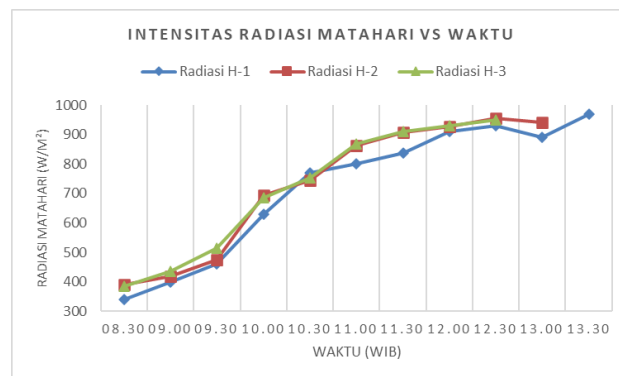
Sementara itu, metode pengeringan konvensional sangat dipengaruhi oleh fluktuasi intensitas radiasi matahari, temperatur lingkungan, dan kelembapan udara selama proses pengeringan berlangsung. Pada kondisi tertentu, metode konvensional mampu menghasilkan laju penurunan massa yang lebih cepat akibat pengaruh radiasi matahari langsung terhadap permukaan bahan. Namun, karakteristik pengeringannya cenderung tidak stabil pada setiap pengujian.

Secara umum, sistem pengering berbasis panas kondensor menunjukkan performa pengeringan yang lebih stabil dan tidak bergantung secara langsung terhadap kondisi cuaca lingkungan dibandingkan metode pengeringan konvensional. Perbedaan karakteristik kedua metode selanjutnya dianalisis berdasarkan parameter radiasi matahari,

temperatur ruang pengering, kelembapan relatif, penurunan massa bahan, *Moisture content* (MC), *Moisture ratio* (MR), *Drying rate* (DR), serta konsumsi energi sistem selama proses pengeringan berlangsung.

A. Karakteristik Radiasi Matahari pada Pengeringan Konvensional

Intensitas radiasi matahari merupakan salah satu parameter utama yang mempengaruhi performa pengeringan konvensional. Pada metode pengeringan konvensional, energi panas diperoleh secara langsung dari radiasi matahari sehingga perubahan intensitas radiasi selama proses pengeringan akan mempengaruhi temperatur lingkungan dan kelembapan relatif *Relative Humidity* (RH) selama proses pengeringan berlangsung [18]. Karakteristik intensitas radiasi matahari selama proses pengeringan konvensional ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Karakteristik Intensitas Radiasi Matahari Selama Proses Pengeringan Konvensional.

Berdasarkan Gambar 3, intensitas radiasi matahari cenderung mengalami peningkatan seiring bertambahnya waktu pengeringan. Pada awal pengujian pukul 08.30 WIB, intensitas radiasi matahari masih berada pada kisaran 340-390 W/m² dan kemudian meningkat secara bertahap hingga mencapai lebih dari 900 W/m² pada siang hari.

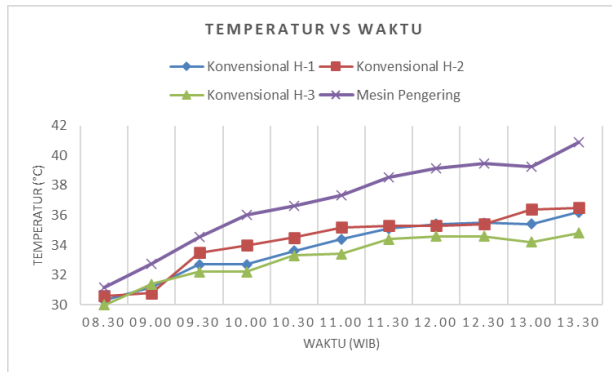
Peningkatan intensitas radiasi matahari menyebabkan energi panas yang diterima permukaan bahan menjadi lebih besar sehingga temperatur permukaan ikan meningkat dan proses evaporasi air berlangsung lebih cepat [19]. Kondisi tersebut juga berpengaruh terhadap perubahan temperatur lingkungan dan penurunan kelembapan relatif selama proses pengeringan berlangsung.

Hasil pengujian menunjukkan adanya perbedaan intensitas radiasi matahari pada setiap hari pengujian. Fluktuasi tersebut dipengaruhi oleh kondisi cuaca dan lingkungan selama proses pengeringan berlangsung. Meskipun demikian, pola perubahan radiasi matahari pada ketiga pengujian menunjukkan kecenderungan yang relatif serupa, yaitu mengalami peningkatan menuju siang hari.

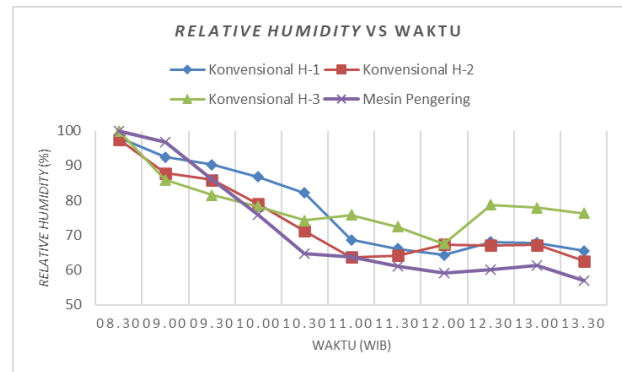
Pada kondisi tertentu, tingginya intensitas radiasi matahari menyebabkan metode pengeringan konvensional mampu menghasilkan laju pengeringan yang lebih cepat dibandingkan sistem pengering berbasis panas kondensor akibat adanya pemanasan langsung pada permukaan bahan. Namun, karakteristik pengeringan konvensional cenderung kurang stabil karena sangat dipengaruhi oleh perubahan kondisi lingkungan selama proses pengeringan berlangsung.

B. Karakteristik Temperatur dan *Relative Humidity* (RH)

Karakteristik temperatur dan *Relative Humidity* (RH) merupakan parameter penting yang mempengaruhi proses pengeringan bahan. Peningkatan temperatur udara pengering mempercepat evaporasi air pada ikan karena tekanan uap air di permukaan bahan meningkat. Penurunan RH juga meningkatkan kemampuan udara menyerap uap air sehingga perpindahan massa air dari ikan ke udara berlangsung lebih efektif [19]. Perbandingan temperatur antara metode pengeringan konvensional dan sistem pengering berbasis panas kondensor ditunjukkan pada Gambar 4. Sementara itu, karakteristik RH selama proses pengeringan ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 4. Grafik Temperatur Selama Proses Pengeringan



Gambar 5. Grafik *Relative Humidity* Selama Proses Pengeringan

Berdasarkan Gambar 4, sistem pengering berbasis panas kondensor menghasilkan temperatur yang lebih tinggi dan lebih stabil dibandingkan metode konvensional. Temperatur pada sistem pengering berada pada rentang 31,17 - 40,87°C, sedangkan metode konvensional berada pada rentang 30,0 - 36,5°C. Peningkatan temperatur pada sistem pengering terjadi secara bertahap karena panas buang kondensor dilepaskan secara kontinu selama sistem refrigerasi beroperasi.

Sebaliknya, temperatur pada metode konvensional cenderung lebih fluktuatif akibat dipengaruhi perubahan intensitas radiasi matahari dan kondisi lingkungan selama pengujian. Pada beberapa kondisi, metode konvensional menghasilkan kenaikan temperatur yang lebih cepat akibat pemanasan langsung dari radiasi matahari, namun kondisi tersebut tidak berlangsung stabil selama proses pengeringan.

Karakteristik yang serupa juga terlihat pada perubahan RH seperti ditunjukkan pada Gambar 5. Sistem pengering berbasis panas kondensor menunjukkan penurunan RH yang lebih stabil dari 100% menjadi sekitar 57%, sedangkan metode konvensional berada pada rentang 62,7 - 100%. Penurunan RH menunjukkan meningkatnya kemampuan udara pengering dalam menyerap uap air sehingga proses perpindahan massa dan evaporasi air berlangsung lebih efektif.

Secara umum, sistem pengering berbasis panas kondensor menghasilkan kondisi temperatur dan RH yang lebih stabil dibandingkan metode konvensional. Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian Ambarita [9] yang melaporkan bahwa sistem *heat pump dryer* mampu menghasilkan temperatur dan kelembapan udara yang lebih stabil dibandingkan metode pengeringan konvensional. Temperatur yang lebih tinggi dan RH yang lebih rendah pada sistem berbasis refrigerasi meningkatkan kemampuan udara dalam menyerap uap air sehingga proses evaporasi berlangsung lebih efektif. Selain itu, Yaakop [7] menyatakan bahwa pemanfaatan panas buang dari sistem refrigerasi dapat menyediakan sumber energi panas yang lebih stabil dibandingkan pemanfaatan energi surya yang sangat dipengaruhi oleh kondisi cuaca. Temuan tersebut mendukung hasil penelitian ini dimana panas buang kondensor mesin es balok mampu menghasilkan kondisi pengeringan yang lebih stabil dibandingkan metode konvensional.

Stabilitas kondisi termal tersebut mendukung proses pengeringan berlangsung lebih konsisten dan tidak bergantung secara langsung terhadap perubahan kondisi cuaca lingkungan.

Tabel 3. Hasil Uji *Paired Sample t-test* Temperatur dan *Relative Humidity* (RH).

Parameter	Konvensional (Mean ± Standar deviasi)	Mesin Pengering (Mean ± Standar deviasi)	<i>p-value</i>
Temperatur (°C)	34,14 ± 1,81	37,46 ± 3,04	0,000005
<i>Relative Humidity</i> (%)	74,58 ± 10,49	68,63 ± 15,76	0,0124

Keterangan: Nilai mean dan standar deviasi dihitung berdasarkan rata-rata data pada setiap interval waktu pengamatan hasil tiga kali pengujian. Nilai *p-value* diperoleh dari hasil *Paired Sample t-test* pada tingkat signifikansi 5% ($\alpha = 0,05$).

Hasil uji *Paired Sample t-test* menunjukkan bahwa temperatur udara pengering yang dihasilkan oleh sistem pengering berbasis panas buang kondensor berbeda signifikan dibandingkan metode pengeringan konvensional dengan nilai *p-value* sebesar 0,000005 ($p < 0,05$). Temperatur rata-rata pada sistem pengering mencapai $37,46 \pm 3,04^\circ\text{C}$, sedangkan metode konvensional sebesar $34,14 \pm 1,81^\circ\text{C}$. Hasil ini menunjukkan bahwa pemanfaatan panas buang kondensor mampu meningkatkan temperatur udara pengering secara signifikan sehingga mendukung proses evaporasi air dari bahan selama proses pengeringan.

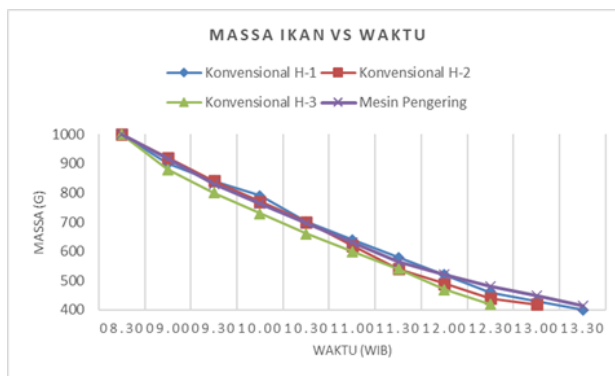
Pada parameter RH, sistem pengering berbasis panas buang kondensor menghasilkan RH rata-rata sebesar $68,63 \pm 15,76\%$, lebih rendah dibandingkan metode pengeringan konvensional sebesar $74,58 \pm 10,49\%$. Hasil uji statistik

menunjukkan nilai p -value sebesar 0,0124 ($p < 0,05$), yang menunjukkan bahwa perbedaan RH antara kedua metode signifikan secara statistik. RH yang lebih rendah menunjukkan bahwa udara pengering memiliki kemampuan yang lebih baik dalam menyerap uap air dari bahan sehingga mendukung proses perpindahan massa air selama proses pengeringan.

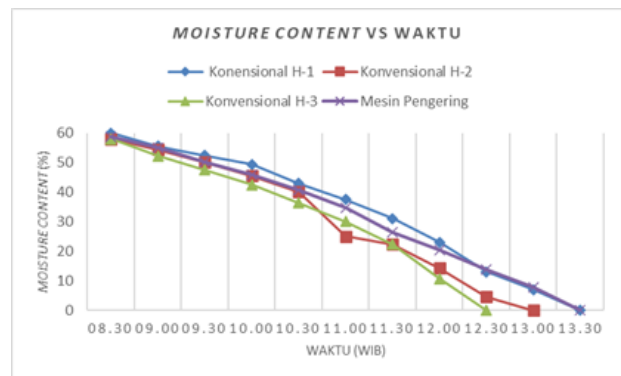
Berdasarkan hasil uji statistik tersebut dapat disimpulkan bahwa pemanfaatan panas buang kondensor mesin es balok mampu menghasilkan kondisi udara pengering yang secara signifikan berbeda dibandingkan metode pengeringan konvensional, ditunjukkan oleh temperatur yang lebih tinggi dan RH yang lebih rendah selama proses pengeringan.

C. Karakteristik Penurunan Massa dan *Moisture content* (MC)

Penurunan massa dan *moisture content* (MC) merupakan indikator utama yang menunjukkan terjadinya proses penguapan air pada bahan selama pengeringan. Semakin besar jumlah air yang menguap, maka massa dan nilai MC bahan akan semakin menurun [18]. Perbandingan karakteristik penurunan massa ikan ditunjukkan pada Gambar 6, sedangkan perubahan MC selama pengeringan ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 6. Grafik Penurunan Massa Ikan Selama Proses Pengeringan



Gambar 7. Grafik Perubahan *Moisture content* (MC) Selama Proses Pengeringan

Berdasarkan Gambar 6, massa ikan pada sistem pengering berbasis panas kondensor menurun dari 1000 gram menjadi 410 gram atau berkurang sekitar 59% selama proses pengeringan. Penurunan massa terjadi akibat penguapan kandungan air dari bahan. Penurunan massa terbesar terjadi pada tahap awal pengeringan karena kandungan air bebas pada permukaan ikan masih tinggi sehingga proses evaporasi berlangsung lebih cepat sebelum memasuki fase penurunan laju pengeringan.

Metode pengeringan konvensional pada beberapa kondisi menunjukkan penurunan massa yang lebih cepat akibat pengaruh radiasi matahari langsung terhadap permukaan bahan. Namun, karakteristik penurunannya cenderung lebih fluktuatif karena dipengaruhi perubahan intensitas radiasi matahari dan kondisi lingkungan selama pengujian. Sebaliknya, sistem berbasis panas kondensor menghasilkan pola penurunan massa yang lebih stabil karena temperatur dan *Relative humidity* (RH) ruang pengering lebih terkontrol.

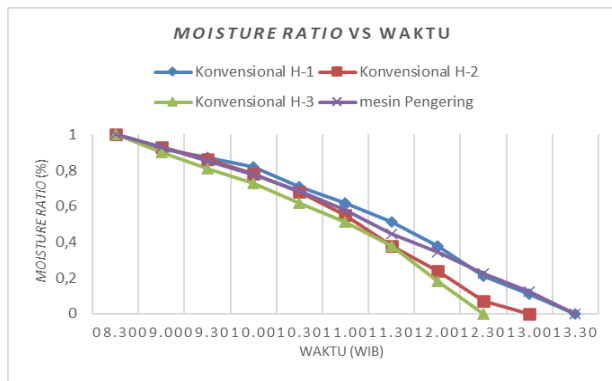
Karakteristik yang serupa juga terlihat pada perubahan MC seperti ditunjukkan pada Gambar 7. Pada sistem pengering berbasis panas kondensor, MC menurun dari 59,0% mendekati 0% pada akhir pengujian. Penurunan MC menunjukkan bahwa proses perpindahan massa air dari bahan menuju udara pengering berlangsung secara kontinu selama pengeringan. Penurunan massa dan MC yang terjadi selama pengeringan menunjukkan bahwa panas buang kondensor mampu menyediakan energi termal yang cukup untuk mendukung proses evaporasi air secara kontinu. Hasil ini sejalan dengan penelitian Adepradana [10] yang melaporkan bahwa sistem *heat pump* berbasis refrigerasi mampu mempercepat penurunan kadar air bahan melalui pengendalian temperatur dan kelembapan udara yang lebih baik dibandingkan pengeringan terbuka. Stabilitas kondisi pengeringan tersebut berperan penting dalam menjaga kontinuitas proses penguapan air selama pengeringan berlangsung.

Secara umum, sistem pengering berbasis panas kondensor menghasilkan karakteristik penurunan massa dan MC yang lebih stabil dibandingkan metode konvensional. Stabilitas temperatur dan RH pada ruang pengering mendukung proses pengeringan berlangsung lebih konsisten dan lebih terkontrol terhadap perubahan kondisi lingkungan.

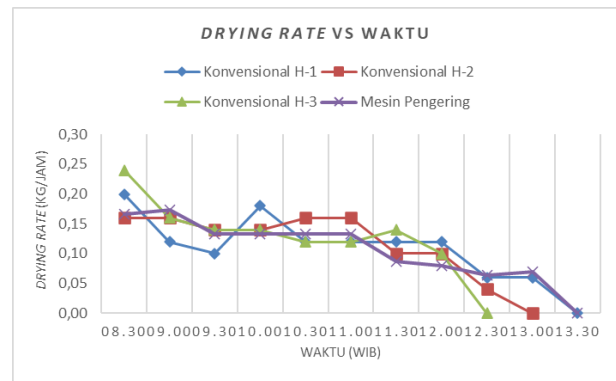
D. Karakteristik *Moisture ratio* (MR) dan *Drying rate* (DR)

Karakteristik *moisture ratio* (MR) dan *drying rate* (DR) digunakan untuk menggambarkan proses perpindahan massa air selama pengeringan. Nilai MR menunjukkan perubahan kandungan air bahan terhadap waktu, sedangkan

DR menunjukkan laju pengurangan kadar air selama proses pengeringan [18]. Perbandingan karakteristik MR ditunjukkan pada Gambar 8, sedangkan karakteristik DR selama proses pengeringan ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 8. Grafik *Moisture ratio* (MR) Selama Proses Pengeringan



Gambar 9. Grafik *Drying rate* (DR) Selama Proses Pengeringan

Berdasarkan Gambar 8, nilai *moisture ratio* (MR) pada kedua metode pengeringan mengalami penurunan secara bertahap seiring bertambahnya waktu pengeringan akibat berkurangnya kandungan air di dalam bahan. Pada sistem pengering berbasis panas kondensor, nilai MR menurun dari 1 menjadi 0 pada akhir pengujian. Penurunan tersebut menunjukkan bahwa proses evaporasi air berlangsung secara kontinu selama pengeringan.

Metode pengeringan konvensional pada beberapa kondisi menunjukkan penurunan MR yang lebih cepat akibat pengaruh radiasi matahari langsung terhadap permukaan bahan. Namun, karakteristik penurunannya cenderung lebih fluktuatif karena dipengaruhi perubahan intensitas radiasi matahari dan kondisi lingkungan selama pengujian. Sebaliknya, sistem berbasis panas kondensor menghasilkan pola penurunan MR yang lebih stabil akibat temperatur dan RH ruang pengering yang lebih terkontrol.

Karakteristik yang serupa juga terlihat pada perubahan *drying rate* (DR) seperti ditunjukkan pada Gambar 9. Pada sistem pengering berbasis panas kondensor, nilai DR berada pada rentang 0,17 - 0,00 kg/jam. Nilai DR tertinggi terjadi pada tahap awal pengeringan ketika kandungan air bebas pada permukaan bahan masih tinggi sehingga proses evaporasi berlangsung lebih cepat. Pada tahap awal pengeringan, air bebas (*free water*) pada permukaan bahan lebih mudah diuapkan sehingga DR relatif tinggi. Setelah kandungan air bebas berkurang, proses pengeringan didominasi oleh perpindahan air terikat (*bound water*) dari bagian dalam bahan menuju permukaan sehingga DR mengalami penurunan. Seiring berkurangnya kandungan air di dalam bahan, nilai DR mengalami penurunan karena proses perpindahan massa air dari bagian dalam bahan menuju permukaan berlangsung lebih lambat. Penurunan DR tersebut menunjukkan bahwa proses pengeringan didominasi oleh *falling rate period* selama pengeringan berlangsung [19].

Secara umum, sistem pengering berbasis panas kondensor menghasilkan karakteristik MR dan DR yang lebih stabil dibandingkan metode konvensional. Stabilitas temperatur dan RH pada ruang pengering mendukung proses perpindahan panas dan perpindahan massa berlangsung lebih konsisten selama proses pengeringan.

E. Analisis *Specific Energy Consumption* (SEC) dan *Specific Moisture Extraction Rate* (SMER)

Analisis *Specific Energy Consumption* (SEC) dan *Specific Moisture Extraction Rate* (SMER) digunakan untuk mengetahui performa energi pada sistem pengering berbasis panas kondensor. Nilai SEC menunjukkan jumlah energi yang dibutuhkan untuk menguapkan massa air dari bahan, sedangkan nilai SMER menunjukkan kemampuan sistem dalam menghilangkan kandungan air terhadap energi listrik yang digunakan [18]. Hasil perhitungan konsumsi energi listrik, massa air yang diuapkan, nilai SEC, dan SMER selama proses pengeringan ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 4. Hasil Perhitungan Konsumsi Energi Listrik, SEC dan SMER

Parameter	Hari 1	Hari 2	Hari 3	Rata-Rata
Energi listrik (kWh)	5,51	5,5	5,54	5,52
Massa Air diuapkan (kg)	0,60	0,58	0,58	0,59
SEC (kWh/kg)	9,18	9,48	9,55	9,40
SMER (kg/kWh)	0,10	0,10	0,10	0,10

Berdasarkan hasil pengujian selama tiga hari, rata-rata konsumsi energi listrik sistem pengering sebesar 5,52 kWh dengan rata-rata massa air yang diuapkan sebesar 0,59 kg. Nilai rata-rata SEC yang dihasilkan sebesar 9,40 kWh/kg, sedangkan nilai rata-rata SMER sebesar 0,1 kg/kWh. Nilai tersebut menunjukkan bahwa energi listrik yang digunakan

untuk proses pengeringan masih relatif besar dibandingkan jumlah air yang berhasil diuapkan selama proses pengeringan berlangsung.

Tingginya nilai SEC dipengaruhi oleh performa sistem refrigerasi yang belum optimal, terutama pada kapasitas kompresor dan karakteristik kondensor yang digunakan pada sistem pengereng. Kompresor *Kulthorn Kirby AW2464ZK* yang digunakan menghasilkan panas kondensor yang masih terbatas sehingga temperatur ruang pengereng belum cukup tinggi untuk meningkatkan proses evaporasi air secara maksimal. Temperatur pengereng yang relatif rendah menyebabkan proses perpindahan panas dari udara pengereng menuju permukaan bahan berlangsung lebih lambat sehingga energi listrik yang digunakan menjadi lebih besar terhadap jumlah air yang diuapkan.

Selain itu, pemilihan kondensor juga mempengaruhi efektivitas pemanfaatan panas buang pada sistem pengereng. Proses perpindahan panas dari kondensor menuju udara pengereng dipengaruhi oleh perbedaan temperatur antara temperatur kondensasi refrigeran dan temperatur lingkungan. Semakin besar perbedaan temperatur tersebut, maka laju perpindahan panas dari kondensor menuju udara pengereng akan semakin tinggi [20]. Pada penelitian ini, temperatur kondensasi yang dihasilkan belum cukup tinggi dibandingkan temperatur lingkungan sehingga pelepasan panas dari kondensor menuju ruang pengereng belum berlangsung optimal. Kondisi tersebut menyebabkan pemanfaatan panas buang kondensor melalui metode *waste heat recovery* belum mampu menghasilkan energi panas yang maksimal untuk proses pengeringan.

Nilai SMER yang relatif rendah menunjukkan bahwa kemampuan sistem dalam menguapkan massa air terhadap energi listrik yang digunakan masih terbatas. Rendahnya nilai SMER dipengaruhi oleh jumlah panas yang tersedia pada ruang pengereng belum mampu meningkatkan laju evaporasi air secara signifikan. Kondisi tersebut terlihat dari nilai DR yang cenderung menurun selama proses pengeringan berlangsung. Seiring berkurangnya kandungan air di dalam bahan, proses perpindahan massa air dari bagian dalam bahan menuju permukaan berlangsung lebih lambat sehingga energi yang dibutuhkan untuk proses pengeringan menjadi lebih besar [18].

Meskipun nilai SEC yang dihasilkan masih relatif tinggi dan nilai SMER masih rendah, sistem pengereng berbasis panas kondensor tetap menunjukkan karakteristik pengeringan yang lebih stabil dibandingkan metode konvensional. Sistem pengereng mampu menghasilkan temperatur dan RH yang lebih terkontrol sehingga proses pengeringan tidak bergantung secara langsung terhadap perubahan kondisi cuaca lingkungan. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pemanfaatan panas buang kondensor memiliki potensi sebagai sumber energi alternatif pada sistem pengereng ikan berbasis *waste heat recovery*. Namun, optimasi lebih lanjut masih diperlukan terutama pada kapasitas kompresor, temperatur kondensasi, dan pemilihan kondensor untuk meningkatkan performa perpindahan panas dan efisiensi energi sistem pengereng.

Nilai SEC sebesar 9,40 kWh/kg dan SMER sebesar 0,10 kg/kWh menunjukkan bahwa sistem masih memerlukan optimasi lebih lanjut untuk meningkatkan efisiensi energi. Hasil tersebut sejalan dengan penelitian Andini et al. [11] yang menunjukkan bahwa performa pengereng berbasis panas buang kondensor sangat dipengaruhi oleh kapasitas kompresor, temperatur kondensasi, dan efektivitas perpindahan panas pada kondensor. Penelitian Xu [8] juga menjelaskan bahwa peningkatan pemanfaatan panas buang melalui optimasi sistem heat pump dapat meningkatkan performa termal dan efisiensi energi sistem pengereng. Oleh karena itu, peningkatan kapasitas perpindahan panas pada kondensor berpotensi menurunkan nilai SEC dan meningkatkan nilai SMER pada sistem yang dikembangkan.

KESIMPULAN

Sistem pengereng ikan berbasis pemanfaatan panas buang kondensor berhasil digunakan sebagai sumber energi alternatif pada proses pengeringan ikan. Sistem pengereng menghasilkan temperatur dan *Relative Humidity* (RH) yang lebih stabil dibandingkan metode konvensional sehingga proses perpindahan panas dan evaporasi air berlangsung lebih konsisten serta tidak bergantung secara langsung terhadap kondisi cuaca lingkungan.

Hasil pengujian menunjukkan massa ikan menurun dari 1000 gram menjadi 410 gram dengan penurunan *moisture content* (MC) dari 59,0% mendekati 0%. Nilai *moisture ratio* (MR) mengalami penurunan secara bertahap selama proses pengeringan, sedangkan *drying rate* (DR) berada pada rentang 0,17 - 0,00 kg/jam dan cenderung menurun seiring berkurangnya kandungan air di dalam bahan.

Rata-rata konsumsi energi listrik sistem pengereng sebesar 5,52 kWh dengan nilai *Specific Energy Consumption* SEC sebesar 9,40 kWh/kg dan *Specific Moisture Extraction Rate* (SMER) sebesar 0,1 kg/kWh. Nilai tersebut menunjukkan bahwa sistem pengereng masih memerlukan optimasi lebih lanjut terutama pada kapasitas kompresor dan pemilihan kondensor untuk meningkatkan temperatur kondensasi, performa perpindahan panas, dan efisiensi energi pengeringan. Meskipun demikian, sistem pengereng berbasis *waste heat recovery* memiliki potensi sebagai alternatif sistem pengereng ikan yang lebih stabil dan terkontrol.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Badan Riset Inovasi Nasional (BRIN) dan Program Studi Teknik Mesin Universitas Widyatama yang telah memberikan bimbingan, arahan, serta dukungan selama proses perancangan alat, pelaksanaan pengujian, hingga penyelesaian penelitian ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah membantu proses pengambilan data dan pelaksanaan penelitian sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.

REFERENSI

- [1] D. S. A. Delfiya, K. Prashob, S. Murali, P. V. Alfuya, manoj p Samuel, and R. Pandiselvam, "Drying kinetics of food materials in infrared radiation drying: A review," *Journal of Food Process Engineering*, vol. 45, no. 6, p. 13810, 20-Jun-2022.
- [2] R. Maulidya, I. Maghfira, F. Syahputra, A. Thaib, and A. Rusliana, "Pengaruh Metode Pengawetan Tradisional terhadap Kadar Air pada Jenis Ikan Berbeda," *J. TILAPIA (Ilmu Perikan. dan Perairan)*, vol. 5, no. 2, pp. 50–53, 2024.
- [3] L. D. T. Selan, "Analisis Eksperimental Variasi Kecepatan Aliran Udara Panas Pada Proses Pengeringan Ikan Menggunakan Rumah Pengering Tipe UV Solar Dryer," vol. 10, no. 02, pp. 35–41, 2023.
- [4] A. N. Alam, "Recent trends in drying and dehydration of fishery products," *Recent Adv. Fish Process. Technol.*, no. September, pp. 1–22, 2023.
- [5] K. K. Dash and S. Chakraborty, *Food Processing: Advances in Non-Thermal Technologies*. 2021.
- [6] S. Jangam, "Advances in Heat Pump-Assisted Drying Technology edited by Vasile Minea," *Dry. Technol.*, vol. 35, no. 4, pp. 522–523, Mar. 2017.
- [7] S. N. Yaakop, M. H. F. Md Fauadi, and A. A. M. Damanhuri, "Experimental Study on Heat Recovery of Air Dryer from Waste Heat Energy of Condensing Unit from VCRS Air Conditioner," *Nat. Environ. Pollut. Technol.*, vol. 22, no. 1, pp. 149–157, Mar. 2023.
- [8] H. Xu, C. Xueye, H. Jiachao, and Y. Bin, "Performance Optimization Analysis of An Air-source Heat Pump with Multi-Stage Waste Heat Recovery," *E3S Web Conf.*, vol. 520, p. 04009, May 2024.
- [9] H. Ambarita, J. F. Pinem, Y. S. Karo-Karo, and H. V. Sihombing, "Experimental study of a closed-cycle heat pump dryer for snakehead fish," *E3S Web Conf.*, vol. 519, p. 03036, May 2024.
- [10] C. S. Adepradana, A. Fudholi, and M. Zurhalki, "Feasibility of Air Conditioning (AC) Utilization as Heat Pump System for Fish Cracker Drying Machine," *AMPLITUDO J. Sci. Technol. Inov.*, vol. 2, no. 2, pp. 108–113, Aug. 2023.
- [11] D. Andini, P. Agustin, P. R. Wahyudi, and F. Amri, "Analisis kinerja mesin pengering hasil panen memanfaatkan energi buang kondensor dengan penambahan heater," *J. REKAYASA ENERGI*, vol. 03, no. 02, pp. 93–100, 2025.
- [12] V. Minea, "Heat-Pump-Assisted Drying: Recent Technological Advances and R&D Needs," *Dry. Technol.*, vol. 31, no. 10, pp. 1177–1189, 2013.
- [13] N. Colak and A. Hepbasli, "A review of heat pump drying: Part 1 - Systems, models and studies," *Energy Convers. Manag.*, vol. 50, no. 9, pp. 2180–2186, 2009.
- [14] M. Zhang, B. Bhesh, and zhongxiang Fang, *Handbook of Drying of Vegetables and Vegetable Products*. CRC Press, 2017.
- [15] A. Lakshmi Kanthan Bharathi and S. Kalaiselvam, "Performance evaluation of low-temperature operated desiccant wheel integrated heat pump drying system for ponyfish (*Leiognathus equula*) drying," *Int. J. Refrig.*, vol. 173, pp. 55–67, 2025.
- [16] H. ATALAY, "Klasik Isı Pompalı Kurutucunun Performans Ve Sürdürülebilirlik Analizinin Deneysel Olarak İncelenmesi," *Deu Muhendis. Fak. Fen ve Muhendis.*, vol. 25, no. 75, pp. 625–637, Sep. 2023.
- [17] J. Song *et al.*, "Study on Optimal Operation of Heat Pump Drying System Throughout the Entire Drying Process Based on the Material Drying Characteristics," *Processes*, vol. 13, no. 12, p. 3883, Dec. 2025.
- [18] J. Adamiec, "Handbook of Industrial Drying, Fourth Edition," *Handb. Ind. Drying, Fourth Ed.*, pp. 895–916, 2014.
- [19] Z. Erbay and F. Icier, "A review of thin layer drying of foods: Theory, modeling, and experimental results," *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, vol. 50, no. 5, pp. 441–464, 2010.
- [20] M. Yahya, "Comparison of solar dryer and solar-assisted heat pump dryer for cassava," *Sol. Energy*, vol. 136, pp. 606–613, 2016.