



Pengaruh Variasi Suhu pada Rotary Dryer terhadap Karakteristik Pengeringan Biji Kopi

Rudy Sutanto^{1*}, I Gede Bawa Susana²

^{1,2}Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Mataram, Mataram, Indonesia

Email: ^{1*}r.sutanto@unram.ac.id, ²gedebawa@unram.ac.id

Abstract

The use of a rotary dryer in the coffee bean drying process offers advantages in heating homogeneity and increased contact between the material and the drying medium. This study aims to analyze the effect of variations in the rotary dryer operating temperature on the drying characteristics of coffee beans in terms of changes in mass, moisture content, and drying rate. Experimental testing was conducted using four temperature levels, namely 40 °C, 50 °C, 60 °C, and 70 °C. The drying process lasted for 360 minutes with data collection intervals every 30 minutes to monitor the dynamics of moisture content reduction as a function of time. The results showed that increasing the rotary dryer operating temperature significantly accelerated the process of reducing the mass and moisture content of coffee beans. At a temperature of 70 °C, the rate of moisture reduction occurred the fastest compared to other temperature variations, while at a temperature of 40 °C the process was slower and tended to be stable. The drying rate showed a maximum value in the initial stage of drying, then decreased gradually as the moisture content in the material decreased. This phenomenon indicates a transition in the mass transfer mechanism from the dominance of free water evaporation to a slower internal moisture diffusion. Overall, temperature variations in rotary dryers significantly impact the drying dynamics of coffee beans. Determining the correct operating temperature is crucial for achieving optimal process efficiency while minimizing potential changes in material quality during drying.

Keywords: Drying, Rotary, Coffee Beans, Moisture Content, Drying Rate.

Abstrak

Penggunaan *rotary dryer* dalam proses pengeringan biji kopi menawarkan keunggulan dalam homogenitas pemanasan dan peningkatan kontak antara bahan dan media pengering. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi suhu operasi *rotary dryer* terhadap karakteristik pengeringan biji kopi yang ditinjau dari perubahan massa, kadar air, dan laju pengeringan. Pengujian dilakukan secara eksperimental menggunakan empat tingkat suhu, yaitu 40 °C, 50 °C, 60 °C, dan 70 °C. Proses pengeringan berlangsung selama 360 menit dengan interval pengambilan data setiap 30 menit untuk memantau dinamika penurunan kadar air sebagai fungsi waktu. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan suhu operasi *rotary dryer* mempercepat proses reduksi massa dan kadar air biji kopi secara signifikan. Pada suhu 70 °C, laju penurunan kadar air terjadi paling cepat dibandingkan variasi suhu lainnya, sedangkan pada suhu 40 °C proses berlangsung lebih lambat dan cenderung stabil. Laju pengeringan memperlihatkan nilai maksimum pada tahap awal pengeringan, kemudian menurun secara bertahap seiring berkurangnya kandungan air dalam bahan. Fenomena ini mengindikasikan terjadinya transisi mekanisme perpindahan massa dari dominasi penguapan air bebas menuju difusi kelembapan internal yang lebih lambat. Secara keseluruhan, variasi suhu pada *rotary dryer* berpengaruh nyata terhadap dinamika pengeringan biji kopi. Penentuan suhu operasi yang tepat menjadi faktor penting untuk memperoleh efisiensi proses yang optimal tanpa mengabaikan potensi perubahan mutu bahan selama pengeringan.

Kata Kunci: Pengeringan, Rotary, Biji Kopi, Kadar Air, Laju Pengeringan.

1. PENDAHULUAN

Proses pengeringan merupakan tahapan krusial dalam penanganan pascapanen komoditas pertanian karena berfungsi menurunkan kadar air hingga batas aman penyimpanan serta menjaga stabilitas mutu fisik dan kimia bahan. Pengendalian suhu, kecepatan aliran udara, serta konfigurasi sistem pengering sangat menentukan efektivitas perpindahan panas dan massa selama proses berlangsung (Alves et al., 2020; Alit & Susana, 2020; Ibrahim et al., 2023; Maulana et al., 2024). Dalam beberapa tahun terakhir, perhatian terhadap efisiensi energi dan keberlanjutan sistem pengeringan semakin meningkat, terutama pada sistem berbasis energi biomassa dan rekayasa termal yang lebih hemat energi (A'yuni et al., 2024; Komanee et al., 2025).

Rotary dryer merupakan salah satu teknologi pengeringan yang banyak digunakan dalam skala industri karena kemampuannya menghasilkan kontak kontinu antara bahan dan media pengering melalui rotasi silinder. Mekanisme ini memungkinkan pencampuran yang lebih homogen dibandingkan sistem pengering statis sehingga distribusi panas menjadi lebih merata (Suherman et al., 2023; Susanto et al., 2024; Akbar, 2021). Evaluasi performa rotary dryer pada berbagai komoditas menunjukkan bahwa parameter suhu dan kecepatan rotasi memiliki pengaruh signifikan terhadap laju penurunan kadar air serta waktu pengeringan total (Susanto et al., 2024; Alit & Susana, 2022).

Perkembangan teknologi pengeringan menunjukkan adanya perbandingan kinerja antara berbagai metode seperti *rotary dryer*, *fluidized bed dryer*, dan *solar drying system*. Sistem *fluidized bed dryer* diketahui memiliki keunggulan dalam meningkatkan koefisien perpindahan panas dan massa akibat kondisi fluidisasi partikel yang intensif, sehingga menghasilkan laju pengeringan yang relatif tinggi dan seragam. Namun demikian, metode ini membutuhkan konsumsi energi yang lebih besar serta sistem kontrol yang lebih kompleks (Ibrahim et al., 2023). Di sisi lain, *solar drying* menawarkan keunggulan dalam efisiensi energi dan keberlanjutan lingkungan, tetapi sangat bergantung pada kondisi cuaca dan memiliki keterbatasan dalam menjaga kestabilan temperatur serta homogenitas pengeringan (Fatharani et al., 2023).

Dibandingkan dengan kedua metode tersebut, *rotary dryer* menawarkan keseimbangan antara efisiensi energi, kapasitas produksi, dan homogenitas pengeringan melalui mekanisme rotasi silinder yang memungkinkan kontak kontinu antara bahan dan udara panas. Sistem ini mampu mengurangi *thermal gradient* yang berlebihan pada bahan serta meningkatkan keseragaman distribusi panas tanpa memerlukan sistem kontrol yang terlalu kompleks seperti pada *fluidized bed dryer* (Suherman et al., 2023; Susanto et al., 2024). Meskipun demikian, karakteristik kinetika pengeringan pada *rotary dryer* cenderung didominasi oleh periode laju menurun akibat keterbatasan difusi internal bahan, sehingga optimasi parameter operasi, khususnya suhu, menjadi faktor krusial dalam meningkatkan performa sistem.

Secara kinetika, peningkatan suhu udara pengering akan meningkatkan gradien tekanan uap antara permukaan bahan dan udara sekitar, sehingga mempercepat evaporasi air bebas pada tahap awal pengeringan (Chindaruksa et al., 2023; Walker & Sheehan, 2022; Sandeep et al., 2021). Seiring berkurangnya kandungan air, mekanisme perpindahan massa bergeser menuju difusi kelembapan internal yang dikendalikan oleh hambatan struktural bahan, yang menyebabkan laju pengeringan menurun secara progresif (Walker & Sheehan, 2022; Acar et al., 2022). Fenomena ini menunjukkan pentingnya pendekatan model kinetika untuk menggambarkan dinamika kadar air sebagai fungsi waktu dan suhu operasi (Chindaruksa et al., 2023; Fatharani et al., 2023).

Dalam konteks pengeringan kopi dan komoditas sejenis, penelitian menunjukkan bahwa suhu tinggi dapat mempercepat proses pengeringan namun harus dikendalikan agar tidak menurunkan kualitas produk akhir (Abdissa et al., 2023; Coradi et al., 2021; Wahyuni et al., 2023). Studi eksperimental pada sistem rotary maupun fluidized bed dryer menunjukkan bahwa optimasi suhu dan aliran udara berkontribusi terhadap efisiensi energi sekaligus mempertahankan karakteristik mutu bahan (Ibrahim et al., 2023; Maulana et al., 2024; Coradi et al., 2021). Selain itu, analisis energi dan emisi karbon pada sistem rotary dryer menunjukkan bahwa peningkatan efisiensi termal menjadi faktor penting dalam pengembangan teknologi pengeringan berkelanjutan (A'yuni et al., 2024).

Perkembangan teknologi pengeringan modern juga mengarah pada integrasi sistem kontrol cerdas dan optimasi parameter operasi berbasis model matematis (Susanto et al., 2024). Pendekatan ini memungkinkan prediksi laju pengeringan dan kadar air akhir secara lebih akurat sehingga proses dapat dikendalikan dengan presisi tinggi. Kajian terbaru dalam bidang rekayasa pengeringan menekankan pentingnya analisis komprehensif antara suhu, kecepatan aliran udara, serta karakteristik fisik bahan dalam menentukan performa sistem (Komanee et al., 2025; Acar et al., 2022).

Meskipun berbagai penelitian telah mengkaji pengaruh suhu terhadap proses pengeringan, kajian eksperimental yang secara khusus menganalisis dinamika penurunan kadar air pada rotary dryer dengan variasi suhu terkontrol masih memerlukan penguatan, terutama dalam konteks karakterisasi laju pengeringan dan identifikasi fase kinetika dominan (Suherman et al., 2023; Chindaruksa et al., 2023). Sebagian penelitian lebih berfokus pada metode pengeringan alternatif seperti solar dryer atau sistem konveksi non-rotasi (Fatharani et al., 2023; Wahyuni et al., 2023), sehingga kontribusi ilmiah terkait karakteristik pengeringan pada rotary dryer tetap relevan untuk dikembangkan lebih lanjut.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi suhu operasi pada alat pengering rotary terhadap perubahan massa, kadar air, dan laju pengeringan sebagai fungsi waktu. Pendekatan eksperimental dilakukan dengan pengamatan periodik untuk mengidentifikasi pola kinetika serta dinamika perpindahan massa selama proses berlangsung. Hasil penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan model pengeringan berbasis sistem rotasi sekaligus menjadi referensi dalam penentuan parameter operasi yang efisien dan berkelanjutan sesuai perkembangan teknologi pengeringan modern (A'yuni et al., 2024; Komanee et al., 2025; Chindaruksa et al., 2023).

Pemilihan rentang suhu 40°C–70°C dalam penelitian ini tidak hanya didasarkan pada pertimbangan teknis sistem pengering, tetapi juga mempertimbangkan stabilitas senyawa kimia penting dalam biji kopi. Biji kopi mengandung berbagai komponen bioaktif seperti asam klorogenat (*chlorogenic acids*), kafein, dan senyawa volatil yang berperan dalam pembentukan cita rasa dan aroma. Studi sebelumnya menunjukkan bahwa suhu di atas 70°C berpotensi menyebabkan degradasi termal senyawa fenolik, khususnya asam klorogenat, yang dapat menurunkan kualitas sensori dan nilai fungsional kopi (Sandeep et al., 2021; Coradi et al., 2021). Sebaliknya, penggunaan suhu yang terlalu rendah (<40°C) dapat memperpanjang waktu pengeringan secara signifikan, sehingga meningkatkan risiko pertumbuhan mikroorganisme dan degradasi kualitas akibat aktivitas enzimatik.

Dengan demikian, rentang suhu 40°C–70°C dipilih sebagai kompromi antara efisiensi proses pengeringan dan konservasi kualitas material. Namun, kajian eksperimental yang secara spesifik mengaitkan parameter suhu pada *rotary dryer* dengan dinamika kinetika pengeringan sekaligus implikasinya terhadap potensi perubahan sifat material kopi masih terbatas. Sebagian besar penelitian sebelumnya lebih berfokus pada

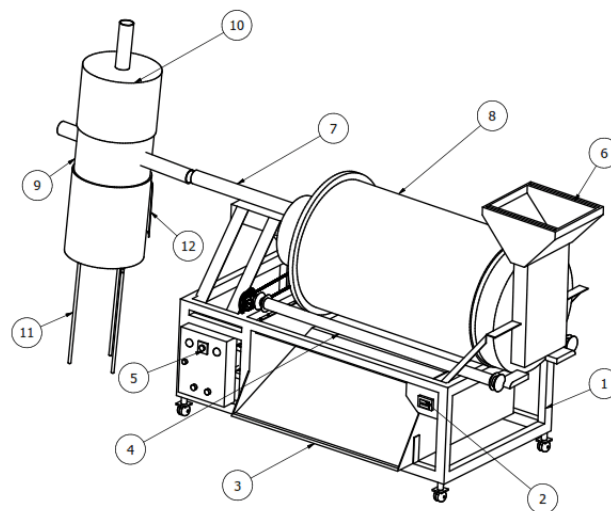
sistem *fluidized bed* atau *solar drying* tanpa memberikan analisis komprehensif pada sistem rotasi (Fatharani et al., 2023; Ibrahim et al., 2023). Oleh karena itu, penelitian ini memiliki kontribusi penting dalam mengisi kesenjangan tersebut melalui pendekatan eksperimental yang mengintegrasikan aspek rekayasa termal dan karakteristik material kopi.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan pendekatan eksperimen untuk mengkaji pengaruh variasi suhu pengeringan pada *rotary dryer*. Pada seluruh rangkaian pengujian, silinder berputar dengan laju putaran 6 rpm sedangkan laju aliran udara panas yang digunakan 5.2 m/s. Variasi suhu udara pengering meliputi 40°C, 50°C, 60°C, dan 70°C. Seluruh percobaan dilaksanakan di Laboratorium Produksi, Program Studi Teknik Mesin, Universitas Mataram.

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah biji kopi jenis Robusta (*Coffea canephora*) yang berasal dari daerah Sembalun Lombok Timur, Nusa Tenggara Barat. Pemilihan jenis Robusta didasarkan pada dominasi produksinya di wilayah tersebut serta karakteristik fisiknya yang sesuai untuk pengujian pengeringan mekanis. Sebelum proses pengeringan, dilakukan pengukuran kadar air awal menggunakan metode oven pada suhu 110°C hingga mencapai massa konstan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kadar air awal biji kopi sebesar 61,5% basis basah (bb). Nilai ini menunjukkan bahwa sampel berada dalam kondisi kadar air tinggi yang umum ditemukan pada biji kopi pascapanen, sehingga memerlukan proses pengeringan untuk mencapai kondisi aman penyimpanan.

Penelitian ini dilakukan untuk mengkaji karakteristik pengeringan biji kopi menggunakan *rotary dryer* (Gambar 1). Proses pengeringan berlangsung selama 360 menit dengan interval pengambilan data setiap 30 menit untuk memantau dinamika penurunan kadar air sebagai fungsi waktu, dengan menggunakan sampel biji kopi sebanyak 5 kg pada setiap variasi percobaan. Selama proses pengeringan, dicatat perubahan massa total dan massa kering biji kopi. Peralatan dan bahan yang digunakan meliputi biji kopi, blower, gas LPG, kompor, penukar kalor, plat *stainless steel*, pipa tembaga, dinamo 1 HP, *gearbox*, *vanbelt*, ruang pengering, termokopel tipe K, *anemometer*, *thermostat*, dan timbangan digital.



Gambar 1. Desain mesin pengering *rotary*. 1.rangka alat pengering, 2. kontrol temperatur, 3. saluran pengeluaran biji kopi, 4. roll dukung, 5. kontrol putaran, 6. saluran pemasukan biji kopi, 7. saluran udara panas, 8. silinder pengering kopi, 9. penukar kalor, 10. Burner, 11. rangka penopang burner, 12. pintu burner

Untuk menjamin validitas data, setiap alat ukur yang digunakan dalam penelitian ini memiliki tingkat akurasi tertentu. Pengukuran suhu menggunakan termokopel tipe K dengan akurasi $\pm 1^\circ\text{C}$, pengukuran kecepatan aliran udara menggunakan anemometer dengan akurasi ± 0.1 m/s, serta pengukuran massa menggunakan timbangan digital dengan resolusi 0.01 kg dan akurasi ± 0.02 kg.

Analisis ketidakpastian pengukuran dilakukan dengan mempertimbangkan propagasi kesalahan dari masing-masing alat ukur terhadap parameter yang dihitung, seperti kadar air dan laju pengeringan. Ketidakpastian total dihitung menggunakan metode akar jumlah kuadrat (*root sum square method*), sehingga diperoleh tingkat kepercayaan data yang dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah. Dengan demikian, data hasil pengujian dinyatakan memiliki tingkat ketidakpastian yang masih dalam batas yang dapat diterima untuk analisis rekayasa termal.

Proses percobaan diawali dengan menyiapkan biji kopi segar sebagai sampel. selanjutnya sampel ditimbang menggunakan timbangan digital untuk mengetahui massa awal sebelum masuk ke tahap pengeringan. Setelah biji kopi siap, sistem pengering dijalankan dengan menyalakan *blower* untuk menghasilkan aliran udara panas dengan laju aliran 5.2 m/s. Sumber panas berasal dari pembakaran LPG pada kompor, dimana energi panas tersebut dialirkan melalui penukar kalor (*heat exchanger*) sebelum masuk ke ruang pengering. Sementara suhu dipantau secara berkelanjutan melalui termokopel tipe K. Selama proses berlangsung, *thermostat* digunakan untuk menjaga kestabilan temperatur agar kondisi operasi tetap sesuai dengan kebutuhan pengeringan.

Secara bersamaan, motor berdaya 1 HP yang terhubung dengan *gearbox* dan sistem sabuk penggerak dioperasikan untuk memutar ruang pengering, sehingga butiran biji kopi dapat tercampur merata dan seluruh permukaan biji kopi memperoleh paparan udara panas secara konsisten dan merata. Proses pengeringan berlangsung selama 360 menit dengan interval pengambilan data setiap 30 menit. Setiap 30 menit sampel dikeluarkan dan ditimbang menggunakan timbangan digital untuk memantau penurunan massa sampel. Data perubahan massa tersebut kemudian digunakan untuk menghitung kadar air serta laju pengeringan biji kopi pada setiap variasi pengujian.

Penentuan massa kering biji kopi (m_k) dilakukan dengan cara memanaskan biji kopi pada suhu 110°C hingga mencapai massa konstan, yang menunjukkan bahwa seluruh kandungan air telah menguap. Nilai kadar air pada basis basah kemudian dihitung menggunakan persamaan berikut (Alit & Susana, 2022; Tanjung et al., 2025):

$$K_a = \frac{m_t - m_k}{m_t} \times 100\% \quad (1)$$

Laju pengeringan pada penelitian ini ditentukan setiap 30 menit selama proses berlangsung. Besarnya laju pengeringan (\dot{m}) dihitung dengan membandingkan jumlah air yang menguap terhadap total waktu pengeringan, dimana massa air yang hilang dinyatakan sebagai m_w (kg) (Alit & Susana, 2022; Tanjung et al., 2025):

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

Massa air yang menguap (m_w) diperoleh dari selisih antara massa awal sampel (m_i) dengan massa setelah dikeringkan (m_f) (Alit & Susana, 2022; Tanjung et al., 2025):

$$m_w = m_i - m_f \quad (3)$$

Setiap pengujian pada masing-masing variasi suhu dilakukan sebanyak tiga kali pengulangan (*triplo*) untuk memastikan konsistensi dan reproduisibilitas data. Nilai yang disajikan dalam hasil penelitian merupakan nilai rata-rata dari tiga kali percobaan, sedangkan deviasi standar digunakan untuk menunjukkan tingkat penyebaran data. Pendekatan ini dilakukan untuk meminimalkan pengaruh kesalahan eksperimental serta meningkatkan reliabilitas hasil analisis.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

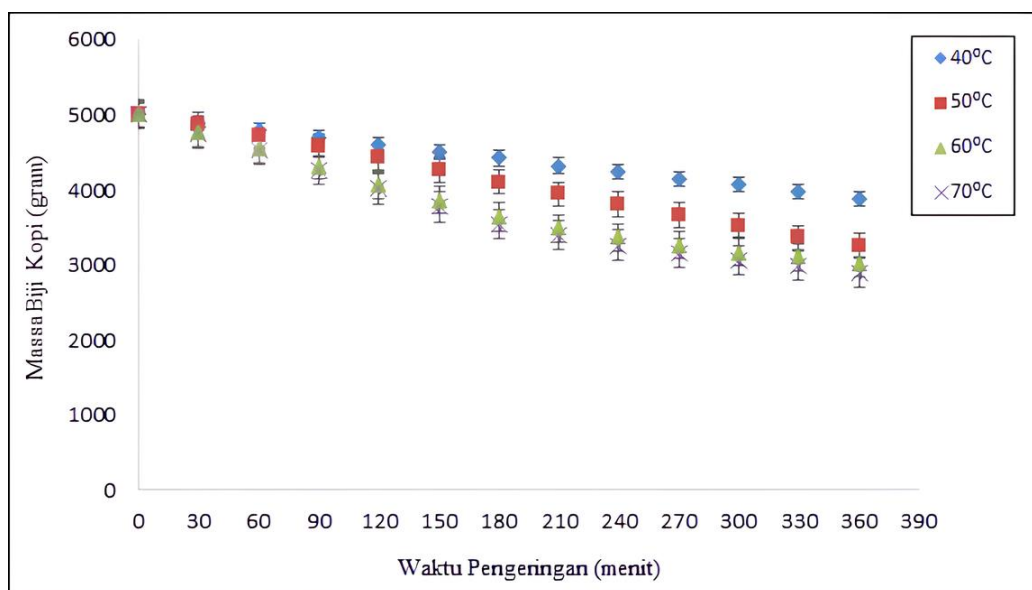
Gambar hubungan waktu pengeringan terhadap massa biji kopi menunjukkan bahwa seluruh variasi suhu menghasilkan pola penurunan massa yang kontinu sepanjang proses pengeringan (Gambar 2). Pada fase awal (0–60 menit), terjadi penurunan massa yang relatif tajam, terutama pada suhu 60°C dan 70°C. Fenomena ini menunjukkan dominasi evaporasi air bebas akibat meningkatnya gradien tekanan uap antara permukaan bahan dan udara pengering, yang semakin besar pada suhu tinggi (Komanee et al., 2025; Chindaruksa et al., 2023). Peningkatan temperatur mempercepat energi kinetik molekul air sehingga proses penguapan berlangsung lebih intensif (A'yuni et al., 2024; Chindaruksa et al., 2023).

Pada suhu 70°C, kurva massa memperlihatkan kemiringan paling besar dibandingkan variasi lainnya. Hal ini mengindikasikan bahwa suhu tinggi meningkatkan koefisien perpindahan panas konveksi dan mempercepat pelepasan kelembapan dari permukaan bahan. Mekanisme ini diperkuat oleh sistem rotasi drum yang menghasilkan pencampuran kontinu sehingga permukaan bahan selalu terekspos udara panas secara merata.

Memasuki fase pertengahan (120–240 menit), penurunan massa mulai melambat pada seluruh variasi suhu. Kondisi ini menunjukkan bahwa kandungan air bebas telah berkurang dan mekanisme perpindahan massa mulai dikendalikan oleh difusi internal dari bagian dalam partikel menuju permukaan (Walker & Sheehan, 2022). Hambatan difusi internal menyebabkan gradien penurunan massa menjadi lebih landai meskipun suhu tetap dijaga konstan (Chindaruksa et al., 2023).

Pada fase akhir (240–360 menit), kurva massa cenderung mendatar. Hal ini menunjukkan bahwa sistem telah mendekati kadar air keseimbangan dan *driving force* perpindahan massa semakin kecil. Pola ini konsisten dengan karakteristik pengeringan bahan pertanian berstruktur padat yang umumnya tidak memiliki periode laju konstan yang panjang (Gambar 2).

Secara komparatif, suhu 70°C memberikan waktu pencapaian massa akhir tercepat, diikuti 60°C, 50°C, dan 40°C. Temuan ini sejalan dengan hasil evaluasi performa *rotary dryer* pada komoditas lain yang menunjukkan bahwa peningkatan suhu mempercepat reduksi massa secara signifikan (A'yuni et al., 2024; Suherman et al., 2023).



Gambar 2. Grafik hubungan antara massa biji kopi dan waktu pengeringan

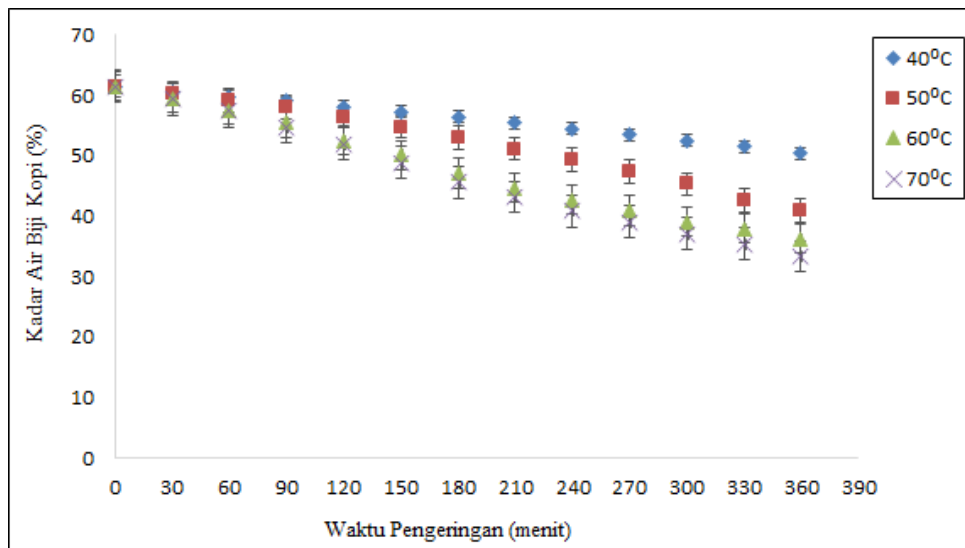
Gambar 3 hubungan kadar air terhadap waktu memperlihatkan pola eksponensial menurun pada seluruh variasi suhu. Pada 120 menit pertama, penurunan kadar air berlangsung cepat, khususnya pada suhu 60°C dan 70°C. Hal ini menunjukkan bahwa pada fase awal, evaporasi air bebas mendominasi proses dan dipercepat oleh peningkatan suhu operasi (Komaneet et al., 2025; Chindaruksa et al., 2023).

Suhu 70°C menghasilkan penurunan kadar air paling signifikan pada setiap interval pengamatan. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan suhu meningkatkan difusivitas efektif kelembapan (*effective moisture diffusivity*), sehingga migrasi air dari bagian dalam partikel menuju permukaan berlangsung lebih cepat (Chindaruksa et al., 2023; Tanjung et al., 2025). Hubungan antara suhu dan peningkatan difusivitas efektif telah dilaporkan dalam berbagai studi kinetika pengeringan bahan pertanian (Walker & Sheehan, 2022).

Sebaliknya, pada suhu 40°C, penurunan kadar air berlangsung lebih lambat dengan gradien kurva yang relatif kecil sepanjang waktu pengeringan. Hal ini menunjukkan bahwa energi panas yang tersedia belum cukup untuk menghasilkan *driving force* perpindahan massa yang besar. Kondisi ini mengindikasikan bahwa suhu rendah memperpanjang waktu pengeringan akibat rendahnya koefisien perpindahan panas konveksi.

Pola dua fase terlihat jelas pada grafik kadar air. Fase pertama ditandai dengan laju penurunan tinggi, sedangkan fase kedua menunjukkan laju menurun secara gradual. Hal ini menunjukkan bahwa proses didominasi oleh periode laju menurun (*falling rate period*), yang dikendalikan oleh difusi internal kelembapan (Walker & Sheehan, 2022). Pada bahan pertanian seperti rimpang dan biji-bijian, periode laju konstan umumnya sangat singkat atau bahkan tidak teridentifikasi secara jelas (A'yuni et al., 2024; Chindaruksa et al., 2023).

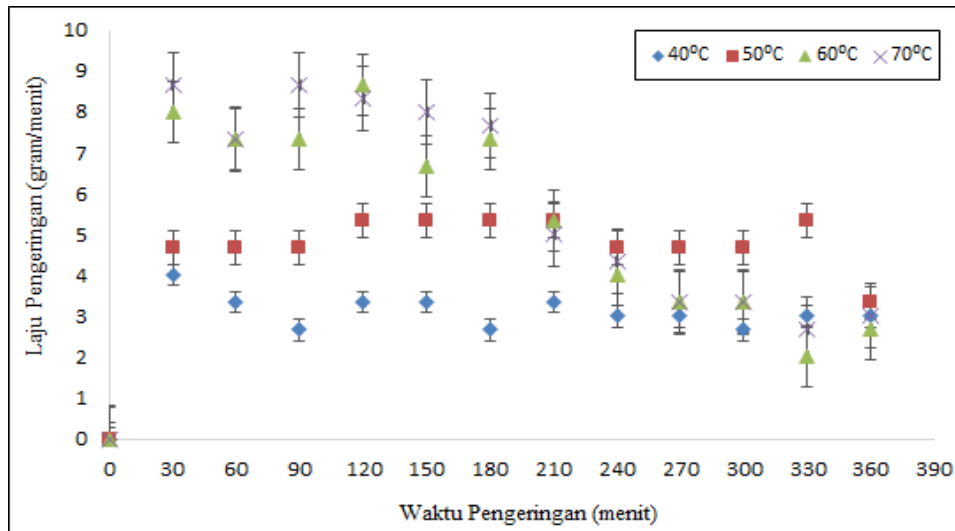
Konsistensi pola antar suhu menunjukkan bahwa *rotary dryer* mampu menciptakan distribusi panas yang relatif homogen melalui mekanisme rotasi drum, sehingga variasi kadar air terutama dipengaruhi oleh suhu, bukan ketidakaturan distribusi panas. Error bars pada setiap titik data menunjukkan standar deviasi yang diestimasi sebesar $\pm 1.5\%$ dari nilai rata-rata untuk kadar air, yang merepresentasikan variabilitas eksperimental berdasarkan pendekatan triplo.



Gambar 3. Grafik hubungan antara kadar air biji kopi dan waktu pengeringan

Pemodelan kinetika pengeringan dilakukan menggunakan model *Newton*, *Page*, dan *Henderson-Pabis*. Hasil analisis menunjukkan bahwa model *Page* memberikan kesesuaian terbaik terhadap data eksperimen dengan nilai koefisien determinasi (R^2)

berkisar antara 0.996 hingga 0.999 serta nilai *chi-square* yang sangat rendah. Nilai konstanta laju pengeringan (*k*) meningkat dari 0.0006 menjadi 0.0031 seiring kenaikan suhu dari 40°C hingga 70°C, yang menunjukkan bahwa peningkatan suhu secara signifikan mempercepat proses pengeringan. Sementara itu, nilai eksponen (*n*) yang lebih besar dari satu mengindikasikan bahwa mekanisme pengeringan didominasi oleh periode laju menurun yang dikendalikan oleh difusi internal kelembapan. Dengan demikian, model *Page* dapat merepresentasikan perilaku kinetika pengeringan biji kopi pada *rotary dryer* secara akurat.



Gambar 4. Grafik hubungan antara laju pengeringan biji kopi dan waktu pengeringan

Grafik laju pengeringan memperlihatkan karakteristik yang paling dinamis dibandingkan grafik lainnya. Pada seluruh variasi suhu, laju pengeringan mencapai nilai maksimum pada awal proses (sekitar 0–60 menit) dan kemudian menurun secara progresif hingga mendekati nol pada akhir pengeringan (Gambar 4).

Nilai laju pengeringan awal tertinggi diperoleh pada suhu 70°C. Hal ini disebabkan oleh tingginya gradien suhu yang meningkatkan laju evaporasi dan koefisien perpindahan massa (Komanee et al., 2025; Chindaruksa et al., 2023). Peningkatan suhu secara langsung memperbesar *driving force* perpindahan kelembapan dari permukaan bahan ke udara pengering (A'yuni et al., 2024).

Setelah fase awal, laju pengeringan menurun tajam. Penurunan ini menunjukkan bahwa kandungan air bebas telah berkurang dan mekanisme difusi internal menjadi pengendali utama proses. Difusi kelembapan internal membutuhkan waktu lebih lama karena harus melewati struktur matriks bahan sebelum mencapai permukaan (Chindaruksa et al., 2023).

Perbandingan antar suhu menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu, semakin tinggi nilai laju pengeringan awal dan semakin cepat transisi menuju kadar air keseimbangan. Namun pada fase akhir, perbedaan laju antar suhu menjadi lebih kecil. Hal ini menunjukkan bahwa pada kadar air rendah, peningkatan suhu tidak lagi memberikan pengaruh signifikan terhadap percepatan proses (Komanee et al., 2025).

Fenomena ini konsisten dengan karakteristik kinetika pengeringan pada *rotary dryer* yang dilaporkan dalam penelitian sebelumnya, di mana fase laju pengeringan menurun mendominasi hampir seluruh durasi pengeringan. Sistem rotasi membantu mempertahankan kontak konveksi yang efektif, tetapi tidak menghilangkan hambatan difusi internal pada fase akhir. Error bars pada setiap titik data menunjukkan standar deviasi yang diestimasi sebesar $\pm 2\%$ untuk laju pengeringan, yang merepresentasikan variabilitas eksperimental berdasarkan pendekatan triplo.

Analisis difusivitas efektif dilakukan menggunakan pendekatan hukum difusi Fick berdasarkan hubungan linier antara $\ln(MR)$ dan waktu. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai difusivitas efektif (D_{eff}) meningkat secara signifikan dengan kenaikan suhu pengeringan, dari $1.39 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ pada suhu 40°C menjadi $7.35 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ pada suhu 70°C . Peningkatan ini menunjukkan bahwa temperatur memiliki peran penting dalam meningkatkan mobilitas kelembapan di dalam struktur biji kopi, sehingga mempercepat proses difusi internal selama pengeringan. Nilai D_{eff} yang diperoleh berada dalam kisaran umum untuk bahan pertanian, yaitu antara 10^{-10} hingga $10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$.

Hubungan antara difusivitas efektif dan suhu dianalisis menggunakan persamaan Arrhenius. Hasil regresi linier antara $\ln(D_{eff})$ dan $1/T$ menghasilkan nilai energi aktivasi sebesar 34.9 kJ/mol . Nilai ini menunjukkan bahwa proses difusi kelembapan pada biji kopi memiliki sensitivitas moderat terhadap perubahan suhu, serta sejalan dengan karakteristik pengeringan bahan pertanian berstruktur padat.

Analisis kualitas biji kopi dilakukan secara visual untuk mengevaluasi perubahan fisik setelah proses pengeringan. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa pada suhu rendah (40°C – 50°C), biji kopi cenderung mempertahankan warna alami dengan tekstur yang relatif lebih keras. Sementara itu, pada suhu lebih tinggi (60°C – 70°C), terjadi perubahan warna menjadi lebih gelap yang mengindikasikan kemungkinan terjadinya reaksi pencoklatan non-enzimatik.

Selain itu, pengeringan pada suhu tinggi berpotensi menurunkan kekerasan biji akibat pengurangan kadar air yang lebih cepat, yang dapat mempengaruhi struktur internal bahan. Fenomena ini sejalan dengan laporan sebelumnya yang menyatakan bahwa suhu pengeringan yang tinggi dapat menyebabkan degradasi senyawa fenolik dan perubahan sifat fisik bahan. Dengan demikian, optimasi suhu pengeringan tidak hanya ditujukan untuk meningkatkan efisiensi proses, tetapi juga untuk mempertahankan kualitas produk akhir.

4. KESIMPULAN

Variasi suhu pada rotary dryer berpengaruh signifikan terhadap karakteristik pengeringan biji kopi. Peningkatan suhu dari 40°C hingga 70°C mempercepat penurunan kadar air dan meningkatkan laju pengeringan, dengan suhu 70°C menunjukkan kinerja paling cepat. Model Page memberikan kesesuaian terbaik dalam menggambarkan kinetika pengeringan, dengan nilai konstanta laju pengeringan yang meningkat seiring kenaikan suhu. Nilai difusivitas efektif juga meningkat pada suhu yang lebih tinggi, menunjukkan percepatan perpindahan kelembapan di dalam bahan. Analisis Arrhenius menghasilkan energi aktivasi sebesar 34.9 kJ/mol yang menunjukkan bahwa proses pengeringan dipengaruhi oleh temperatur dan didominasi oleh difusi internal. Dari sisi kualitas, suhu tinggi berpotensi menyebabkan perubahan warna dan tekstur biji kopi, sehingga diperlukan pemilihan suhu operasi yang optimal untuk menjaga keseimbangan antara efisiensi pengeringan dan kualitas produk.

REFERENCES

- Abdissa, Z. K., Tola, Y. B., Taye, A. H., & Mohammed, H. H. (2023). Harmonizing drying time and layer thickness for drying kinetics of parchment coffee. *International Journal of Food Science*, 2023, 6677592. <https://doi.org/10.1155/2023/6677592>
- Acar, C., Dincer, I., & Mujumdar, A. S. (2022). A comprehensive review of recent advances in renewable-based drying technologies. *Drying Technology*, 40(13), 1029–1050.

- Akbar, T. F. (2021). *Analisis pengaruh variasi kecepatan putaran dan temperatur pada proses pengeringan biji jagung menggunakan mesin rotary dryer dengan pemanas gas LPG* (Disertasi).
- Alit, I. B., & Susana, I. G. B. (2020). Pengaruh kecepatan udara pada alat pengering jagung dengan mekanisme penukar kalor. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 11(1), 77–84.
- Alit, I. B., & Susana, I. G. B. (2022). Evaluasi pengeringan kunyit menggunakan pengering rak vertikal sumber energi sekam padi metode konveksi paksa. *Agrointek*, 16(3), 338–347.
- Alves, G. E., Borém, F. M., Andrade, E. T., Isquierdo, E. P., Siqueira, V. C., & Dias, C. A. (2020). Influence of different temperatures and airflows on drying of natural and pulped coffee. *Engenharia Agrícola*, 40(2), 192–200.
- A'yuni, D. Q., Kurniawan, D., Prayoga, M. P. I., Kumoro, A. C., Djaeni, M., & Subagio, A. (2024). Energy and carbon dioxide emission analysis of a batch-mode rice drying process in a rotary dryer. *Research in Agricultural Engineering*, 70(1).
- Chindaruksa, S., Bongkaew, H., Wardkein, P., & Chantrawongphisal, B. (2023). Effects of hot air temperature on moisture reduction and drying time of turmeric in a closed-system herb dryer: Kinetics and models. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13(17), 16263–16272.
- Coradi, P. C., Martens, S., Rodrigues, H. E., et al. (2021). Development and validation of a heated drying air diffusion system to optimize rotary dryers and final coffee quality. *PLoS ONE*, 16(6), e0251312. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0251312>
- Fatharani, A., Yuwana, Y., Yusuf, D., & Hidayat, L. (2023). Drying characteristics of robusta coffee beans using hybrid dryer based on thin-layer drying kinetics fitting model. *International Journal of Agricultural Technology*, 19(1), 37–52.
- Ibrahim, A. M. F. Q., Salengke, S., Salim, I., & Hardinasinta, G. (2023). The effect of drying air velocity and grain mass on the drying rate of Inpari 42 grain in a fluidized bed dryer. *Salaga Journal*, 22, 22–30.
- Komanee, K., Namkhat, A., Pumchumpol, S., & Teeboonma, U. (2025). Effect of temperature and air velocity on kinetics and energy efficiency of fish fillets drying. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 132(2), 1–17.
- Maulana, I., Anggara, M., & Hidayat, A. (2024). Analisis pengaruh kecepatan aliran udara panas dan waktu pengeringan terhadap laju pengeringan dan kadar air kerupuk tapioka mesin pengering otomatis. *Jurnal Gear*, 2(1), 34–43.
- Sandeep, T. N., Channabasamma, B. B., Gopinandhan, T. N., & Nagaraja, J. S. (2021). The effect of drying temperature on cup quality of coffee subjected to mechanical drying. *Journal of Plantation Crops*, 49(1), 35–41.
- Suherman, I. K., Sudirman, S., Wibolo, A., Wibawa, I. W. S., & Adiaksa, I. M. A. (2023). Performance evaluation of rotary dryer for drying of ginger. Dalam *Proceedings of iCAST-ES* (pp. 1062–1066).
- Susanto, A., Arrosida, H., Echsony, M. E., Mahendra, M. T., & Pambudi, R. N. A. (2024). Analisa karakteristik pengeringan kunyit menggunakan mesin pengering sistem rotasi berbasis ANN-FL. *Manutech*, 16(2), 116–124.
- Tanjung, L. S. G., Sutanto, R., & Mirmanto. (2025). The effect of hot air flow velocity on the drying characteristics of turmeric in a rotary dryer. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 20(2), 229–236.
- Walker, C., & Sheehan, M. (2022). Drying kinetics of macroalgae as a function of drying gas velocity and material bulk density. *Clean Technologies*, 4(3), 669–689.
- Wahyuni, N. L. E., Soeswanto, B., Prihandini, G., et al. (2023). Coffee beans drying using pilot-scaled fluidized bed dryer assisted with zeolite adsorbent. *Fluida*, 16(2), 99–104.