

## BAB 1. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Kerupuk telah dikonsumsi secara luas sebagai pangan pendamping di Indonesia dan diproduksi pada skala rumah tangga hingga UMKM. Salah satu variannya adalah kerupuk mawar, dikenal melalui geometri khas menyerupai bunga serta karakter renyah setelah penggorengan. Dalam rantai proses produksinya, tahap pengeringan diposisikan sebagai tahapan kritis sebelum penggorengan karena kadar air akhir yang dihasilkan akan menentukan kestabilan mutu antar siklus produksi (*antar-batch*), ketahanan simpan, serta keseragaman pengembangan dan tekstur saat digoreng. Kondisi pengeringan pada bahan yang memiliki kadar air tinggi berpotensi mempercepat penurunan mutu selama penyimpanan, sedangkan pengeringan berlebihan berisiko mempengaruhi sifat fisik (misalnya kerapuhan) dan sensori produk pada tahap penggorengan (Lilir & Lontaan, 2021).

Pada praktik UMKM, penjemuran terbuka (*open sun drying*) masih banyak digunakan karena biaya operasional rendah dan teknologinya sederhana. Namun, penjemuran terbuka telah dilaporkan memiliki keterbatasan inheren, yaitu ketergantungan pada cuaca, durasi proses yang relatif panjang, variabilitas mutu produk kering, serta kerentanan terhadap kontaminasi lingkungan (debu, serangga, dan fluktuasi kondisi atmosfer). Selain itu, ketidakmampuan pengendalian parameter proses terutama suhu dan distribusi aliran udara dapat memicu *under drying* maupun *over drying* sehingga mutu dan efisiensi proses berpotensi menurun (Fernandes, 2024).

Sejalan dengan kebutuhan standarisasi dan higienitas proses, penggunaan *food dehydrator* (pengering konveksi dengan sumber panas dan sirkulasi udara terkontrol) dinilai relevan untuk skala UMKM karena kondisi operasi dapat diatur lebih stabil dibanding penjemuran terbuka (Kusumaningrum et al., 2021). Bukti penerapan teknologi pengering pada komunitas produsen kerupuk menunjukkan bahwa perbaikan teknologi pengeringan telah digunakan untuk mengatasi kendala

musim hujan dan meningkatkan keberlanjutan proses produksi (Falasifah et al., 2024). Selain itu, program pendampingan UMKM pada produk sejenis (misalnya rengginang) juga melaporkan bahwa penggunaan *food dehydrator* berbasis pengendalian suhu/waktu dapat mempercepat proses pengeringan dan meningkatkan efisiensi produksi (Abryandoko et al., 2024).

Meskipun demikian, penentuan kondisi operasi *food dehydrator* tidak memadai apabila hanya didasarkan pada pendekatan coba-coba, karena tiap produk memiliki struktur, porositas, serta karakter difusi kelembapan yang berbeda. Oleh karena itu, pendekatan ilmiah melalui kajian kinetika pengeringan lapis tunggal (*single-layer drying*) diperlukan untuk memodelkan perubahan kadar air sebagai fungsi waktu pada variasi suhu tertentu. Pada pengeringan lapis tunggal, sampel disusun satu lapis (tanpa tumpang tindih dominan) agar paparan udara pengering lebih seragam, sehingga data perubahan kadar air dapat dimodelkan secara matematis. Parameter kunci yang digunakan adalah *Moisture Ratio* (MR), yang digunakan untuk Menyusun kurva pengeringan dan mengevaluasi kesesuaian model terhadap data eksperimental (Kim et al., 2021). Pemodelan MR umumnya dilakukan menggunakan model pengeringan lapis tunggal yang bersifat semi-empiris/empiris (misalnya Page, Henderson-pabis, Logarithmic, Midilli-Kucuk, Two-term), kemudian dipilih model terbaik melalui indikator *goodness-of-fit* seperti koefisien determinasi ( $R^2$ ), *root mean square error* (RMSE), dan *Sum of Squared Error* (SSE) (Kilic, 2025).

Selain MR, parameter mekanistik yang penting adalah difusivitas kelembapan efektif ( $D_{\text{eff}}; \text{m}^2/\text{s}$ ), yaitu parameter yang mempresentasikan kemampuan perpindahan kelembapan internal secara efektif di dalam matriks bahan selama pengeringan. Pada banyak bahan pangan, periode laju menurun (*falling rate period*) cenderung dominan, sehingga mekanisme perpindahan massa internal lebih banyak dikendalikan difusi oleh sebab itu, difusivitas kelembapan efektif ( $D_{\text{eff}}$ ) lazim digunakan untuk membandingkan performa pengeringan antar kondisi operasi serta menginterpretasikan pengaruh suhu terhadap perpindahan massa internal (Kim et al., 2021). Kenaikan suhu umumnya diikuti peningkatan difusivitas kelembapan

efektif ( $D_{\text{eff}}$ ) karena energi termal meningkatkan mobilitas molekul air dan mempercepat migrasi kelembapan menuju permukaan. Tren semacam ini juga dilaporkan pada kajian pengeringan berbagai komoditas pangan di mana difusivitas kelembapan efektif ( $D_{\text{eff}}$ ) meningkat pada suhu pengeringan yang lebih tinggi (Mbegbu et al., 2024). Namun demikian, keberhasilan pengeringan tidak hanya ditentukan oleh percepatan penurunan kadar air. Pengeringan merupakan operasi yang intensif energi, sehingga evaluasi efisiensi proses perlu dilakukan secara lebih komprehensif. Analisis energi hanya menggambarkan kuantitas energi masuk/keluar, sedangkan analisis eksergi menilai kualitas energi (potensi energi untuk melakukan kerja berguna) dan menangkap kerugian akibat *ireversibilitas*. Pada pengering udara panas, indikator seperti *exergy inflow* ( $Ex_{\text{in}}$ ), *exergy outflow* ( $Ex_{\text{out}}$ ), *exergy loss* ( $Ex_{\text{loss}}$ ), dan efisiensi eksergi ( $\eta_{\text{ex}}$ ) telah digunakan untuk mengidentifikasi sumber inefisiensi dan peluang perbaikan proses (Okunola et al., 2023). Selain itu, kajian terkini juga menunjukkan bahwa difusivitas kelembapan efektif ( $D_{\text{eff}}$ ), efisiensi energi, dan efisiensi eksergi dapat saling dihubungkan untuk memperkuat interpretasi performa proses dan arahan optimasi, khususnya dalam konteks keberlanjutan proses pengeringan (Zeng Zhiheng & Wang, 2024).

Kajian pengeringan lapis tipis tunggal berbasis MR dan pemodelan matematis telah banyak dilaporkan pada bahan pangan berbentuk irisan atau partikel sederhana, sementara kerupuk mawar memiliki geometri “mekar” dan struktur berpori berbasis pati yang berpotensi menghasilkan bahwa rekomendasi operasional yang spesifik produk masih dibutuhkan karena ketidakseragaman aliran udara dan ketidaktepatan parameter dapat memicu *under-/over-drying* (Asrate & Ali, 2025). Selain itu, penggabungan evaluasi MR- $D_{\text{eff}}$  (untuk menjelaskan kinetika dan mekanisme difusi) dengan analisis eksergi (untuk menilai kualitas pemanfaatan energi) dalam satu rancangan studi pada pengeringan kerupuk menggunakan *food dehydrator* masih relatif terbatas. Dengan demikian, kebaruan penelitian ini diletakkan pada pemetaan performa pengeringan kerupuk mawar pada variasi suhu melalui (i) pemodelan MR, (ii) estimasi difusivitas kelembapan efektif ( $D_{\text{eff}}$ ), dan (iii) evaluasi parameter eksergi, sehingga rekomendasi kondisi operasi yang dihasilkan tidak

hanya mempertimbangkan kecepatan pengeringan, tetapi juga efisiensi termodinamik.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini dipandang penting untuk (1) menyediakan dasar ilmiah penentuan suhu pengeringan kerupuk mawar menggunakan *food dehydrator* melalui kurva MR dan nilai difusivitas kelembapan efektif ( $D_{\text{eff}}$ ), (2) menentukan model pengeringan lapis tipis tunggal yang paling representatif untuk prediksi waktu pengeringan, serta (3) mengevaluasi efisiensi proses menggunakan indikator eksergi agar rekomendasi operasional bersifat lebih utuh, yaitu menggabungkan mutu proses dan efisiensi energi.

Dengan demikian, pemanfaatan *food dehydrator* memiliki keunggulan dibandingkan dengan pengeringan alami, terutama dalam hal waktu pengeringan yang lebih cepat, kualitas produk yang lebih terjamin, serta kemudahan dalam mengatur variabel proses. Oleh karena itu, penerapan dan pengembangan teknologi ini sangat penting, terutama untuk industri makanan kecil hingga menengah yang memerlukan sistem pengeringan yang efisien, bersih, dan terstandarisasi.

## 1.2 Rumusan Masalah

Mengacu pada penjelasan yang telah dipaparkan pada bagian latar belakang, penelitian ini dirancang untuk menjawab beberapa permasalahan, yaitu :

1. Bagaimana pengaruh variasi suhu pengeringan ( $60-80^{\circ}\text{C}$ ) pada *food dehydrator* kurva MR, laju pengeringan, dan waktu mencapai kadar air setimbang pada kerupuk mawar yang dikeringkan secara lapis tunggal?
2. Berapakah nilai difusivitas kelembapan efektif ( $D_{\text{eff}}$ ) pada tiap suhu pengeringan, serta bagaimana kecenderungan perubahan difusivitas kelembapan efektif ( $D_{\text{eff}}$ ) terhadap kenaikan suhu sebagai dominasi perpindahan massa internal selama periode laju menurun?
3. Model pengeringan lapis tunggal manakah yang paling sesuai dalam merepresentasikan data pengeringan kerupuk mawar berdasarkan indikator *goodness-of-fit* ( $R^2$ , RMSE dan SSE)?
4. Bagaimana kinerja termodinamik proses pengeringan berdasarkan parameter eksergi ( $Ex_{in}$ ,  $Ex_{out}$ ,  $Ex_{loss}$ ,  $\eta_{ex}$ ) pada masing-masing suhu, serta suhu

5. operasi manakah yang memberikan kompromi terbaik antara kecepatan pengeringan dan efisiensi eksergi?

### 1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Menganalisis pengaruh variasi suhu pengeringan ( $60-80^{\circ}\text{C}$ ) menggunakan *food dehydrator* terhadap karakteristik pengeringan kerupuk mawar, yang meliputi kurva *moisture ratio* (MR), laju pengeringan, serta waktu untuk mencapai kadar air setimbang pada kondisi pengeringan lapis tunggal.
2. Mengestimasi nilai difusivitas kelembapan efektif ( $D_{\text{eff}}$ ) pada setiap variasi suhu serta menganalisis kecenderungan perubahan nilai difusivitas kelembapan efektif ( $D_{\text{eff}}$ ) pada setiap variasi suhu sebagai indikator dominasi perpindahan massa internal pada periode laju pengeringan menurun.
3. Menentukan model pengeringan lapis tunggal terbaik yang paling sesuai dalam merepresentasikan data pengeringan kerupuk mawar berdasarkan *goodness-of-fit* ( $R^2$ , RMSE, SSE).
4. Menganalisis kinerja termodinamik proses pengeringan berdasarkan parameter eksergi ( $Ex_{in}$ ,  $Ex_{Out}$ ,  $Ex_{Loss}$ , dan efisiensi eksergi/ $\eta_{ex}$ ) pada masing-masing variasi suhu.

### 1.4 Batasan Masalah

Beberapa batasan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Penelitian ini memfokuskan proses pengeringan kerupuk mawar menggunakan *food dehydrator*.
2. Suhu pengeringan yang digunakan adalah  $60^{\circ}\text{C}$ ,  $70^{\circ}\text{C}$  dan  $80^{\circ}\text{C}$  menggunakan interval waktu berbeda yaitu suhu  $60^{\circ}\text{C}$ ,  $70^{\circ}\text{C}$  selama 6 menit dan suhu  $80^{\circ}\text{C}$  selama 3 menit.
3. Model matematika yang digunakan terdapat beberapa di antaranya Page, Lewis, Henderson-Pabish, Logarithmic, Verma, Diffusion Approach, Two-Term dan Vega-Galvez yang divalidasi secara statistik ( $R^2$ , SSE, RMSE, AIC dan BIC).

4. Kajian kinerja pengeringan dibatasi pada analisis eksergi ( $Ex\_Loss$  dan  $\eta_{ex}$ ) pada suhu (60-80°C), tanpa membahas parameter termodinamika lain maupun optimasi di luar kondisi penelitian.
5. Penelitian ini dibatasi pada kajian fisik, seperti perpindahan massa dan termodinamika pengeringan. Pengujian kimia seperti uji kadar air dan uji sensoris tidak termasuk dalam ruang lingkup penelitian.

## 1.5 Manfaat Penelitian

### Manfaat ilmiah

1. Kontribusi data dan pemodelan kinetika pengeringan lapis tunggal berbasis MR pada kerupuk mawar sebagai produk tradisional dengan geometri dan struktur berbeda dari bahan pangan irisan/daun.
2. Penguatan rujukan estimasi difusivitas kelembapan efektif ( $D_{eff}$ ) sebagai parameter mekanistik untuk menjelaskan dominasi difusi kelembapan internal pengeringan pada produk berbasis pati.
3. Pengayaan penerapan analisis eksergi pada pengeringan pangan skala kecil sebagai dasar evaluasi kualitas pemanfaatan energi dan identifikasi peluang perbaikan proses.

### Manfaat praktis

1. Penyusunan rekomendasi suhu dan waktu pengeringan kerupuk mawar berbasis data sehingga mutu produk lebih konsisten dan proses produksi lebih terstandarisasi.
2. Dukungan bagi UMKM untuk mengurangi ketergantungan pada penjemuran terbuka yang rentan cuaca dan kontaminasi melalui penerapan teknologi pengeringan terkontrol.
3. Penyediaan pertimbangan efisiensi penggunaan energi melalui indikator eksergi sehingga pemilihan suhu operasi tidak hanya cepat, tetapi juga lebih efisien secara termodinamik.