

SIMULASI NUMERIK PERPINDAHAN PANAS DAN MASSA PADA SISTEM PENDINGINAN BERBASIS UDARA PANAS

Ageng Sufi Fidelli¹, Eflita Yohana² Mohammad Tauviqirrahman²

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

E-mail: fidel.ageng@gmail.com

Abstrak

Simulasi numerik merupakan pendekatan yang efektif dalam memahami fenomena perpindahan panas dan massa selama proses pengeringan berbasis udara panas. Studi ini menyajikan sintesis dari sepuluh penelitian yang menggunakan metode simulasi seperti Computational Fluid Dynamics (CFD), Discrete Element Method (DEM), dan kombinasi keduanya (CFD-DEM) dalam berbagai sistem pengering, termasuk rotary dryer dan oven laboratorium. Hasil simulasi menunjukkan bahwa distribusi suhu dan kelembaban sangat dipengaruhi oleh konfigurasi aliran udara, geometri ruang pengering, serta sifat termofisika material. Validasi eksperimen menunjukkan kecocokan tinggi antara hasil simulasi dan data aktual dengan nilai R^2 lebih dari 0.95. Beberapa studi juga mempertimbangkan deformasi mekanis material selama pengeringan untuk meningkatkan ketepatan model. Temuan ini memperkuat peran simulasi numerik dalam optimalisasi desain pengering dan peningkatan efisiensi energi.

Kata Kunci: deformasi; distribusi suhu; energi; konveksi udara panas

Abstract

Numerical simulation is an effective approach to understanding the phenomena of heat and mass transfer during hot-air drying processes. This study presents a synthesis of ten research articles utilizing simulation methods such as Computational Fluid Dynamics (CFD), Discrete Element Method (DEM), and their coupling (CFD-DEM) across various drying systems, including rotary dryers and laboratory-scale ovens. The results indicate that temperature and moisture distributions are strongly influenced by airflow configuration, drying chamber geometry, and thermophysical properties of the material. Experimental validation showed high agreement between simulation and actual data, with R^2 values exceeding 0.95. Some studies also incorporated mechanical deformation of materials to improve model accuracy. These findings reinforce the role of numerical simulation in dryer design optimization and energy efficiency enhancement.

Keywords: deformation; drying temperature; energy; hot-air convection

1. Pendahuluan

Pengeringan merupakan salah satu proses penting dalam berbagai industri, termasuk pangan, pertanian, farmasi, dan material, karena berperan dalam mengurangi kadar air suatu bahan guna memperpanjang masa simpan, mencegah pertumbuhan mikroorganisme, dan menjaga mutu produk akhir. Pengeringan juga berdampak langsung pada biaya transportasi dan penyimpanan, terutama untuk produk-produk dengan kadar air tinggi seperti hasil pertanian, makanan laut, serta bahan biologis dan farmasetika [3,10].

Salah satu metode pengeringan yang paling umum digunakan di industri adalah pengeringan konvektif menggunakan udara panas. Metode ini relatif sederhana, mudah dioperasikan, serta efisien secara biaya. Namun, di balik kesederhanaannya, proses ini melibatkan fenomena kompleks berupa perpindahan panas dan massa secara simultan serta non-linier. Udara panas yang digunakan tidak hanya berfungsi sebagai media pemanas, tetapi juga sebagai pembawa uap air yang dihasilkan dari penguapan cairan pada permukaan bahan. Interaksi antara suhu udara, kelembaban relatif, laju alir udara, dan karakteristik material menjadikan pengeringan sebagai proses multivariabel yang menantang untuk dianalisis secara eksperimental [1,2,4].

Keterbatasan eksperimen, seperti mahalnya biaya alat, lamanya waktu proses, serta sulitnya mengamati kondisi internal bahan saat pengeringan berlangsung, mendorong berkembangnya pendekatan berbasis simulasi numerik. Dengan bantuan metode numerik seperti Computational Fluid Dynamics (CFD) dan Discrete Element Method (DEM), proses pengeringan dapat dimodelkan secara virtual sehingga memungkinkan analisis distribusi suhu, kelembaban, aliran udara, serta interaksi antara partikel dan fluida secara detail dan efisien [4–6]. Pendekatan ini juga memungkinkan pengujian berbagai konfigurasi alat, variasi parameter operasi, dan skenario desain tanpa harus membangun prototipe secara fisik.

Selain itu, model simulasi numerik dapat mencakup berbagai fenomena tambahan yang memengaruhi kualitas pengeringan, seperti penyusutan material, tegangan termal, deformasi akibat hilangnya kelembaban, serta perubahan struktur internal bahan. Hal ini menjadi sangat relevan terutama pada produk-produk yang sensitif terhadap perubahan bentuk seperti wortel, udang, dan buah-buahan [9,10].

Penggunaan simulasi juga telah meluas dari skala laboratorium hingga simulasi realistis pada skala industri. Penelitian-penelitian terbaru memanfaatkan geometri aktual bahan dan ruang pengering, serta melakukan validasi model dengan data eksperimen untuk memastikan kesesuaian hasil simulasi. Simulasi tiga dimensi dengan geometri tak beraturan kini umum dilakukan, memperbaiki kelemahan pendekatan klasik yang mengasumsikan bentuk sederhana seperti silinder atau kubus [8,10].

Dengan mempertimbangkan urgensi peningkatan efisiensi energi dan mutu produk, simulasi numerik pengeringan menjadi bidang yang terus berkembang dan dibutuhkan dalam pengembangan sistem pengering modern. Oleh karena itu, laporan ini bertujuan untuk menyajikan sintesis dari sepuluh studi simulasi numerik dan validasi eksperimen yang membahas perpindahan panas dan massa dalam sistem pengeringan berbasis udara panas. Fokus diberikan pada pemahaman distribusi suhu dan kelembaban, pengaruh geometri dan konfigurasi alat, serta evaluasi terhadap efisiensi proses dan kualitas produk akhir.

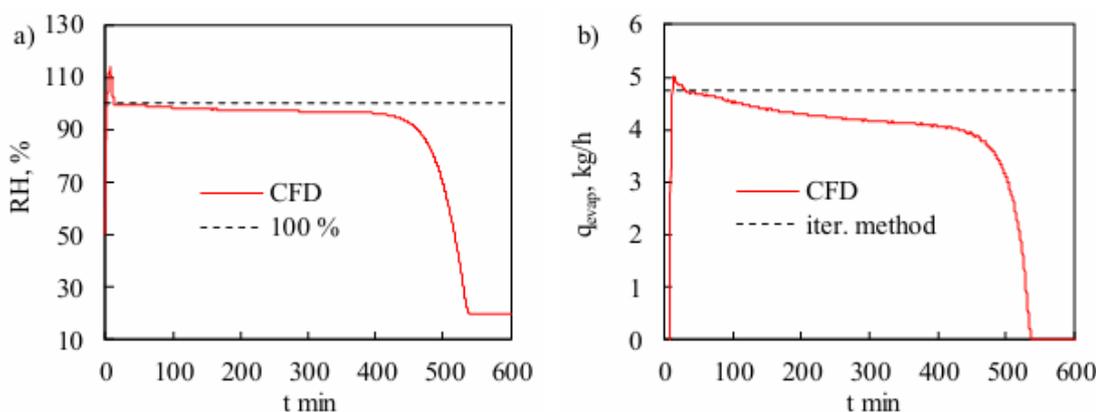
2. Metode Penelitian

Metode yang digunakan dalam kajian ini adalah studi pustaka berbasis analisis terhadap sepuluh artikel ilmiah yang membahas simulasi numerik dan validasi eksperimental proses pengeringan dengan udara panas. Studi ini mengkaji berbagai jenis pengering seperti rotary dryer, oven laboratorium, dan sistem hybrid seperti microwave-convective dryer. Parameter yang diperhatikan meliputi suhu udara masuk, kecepatan udara, kelembaban relatif, serta karakteristik produk seperti ukuran, bentuk, dan jenis bahan.

Pendekatan numerik yang digunakan dalam referensi mencakup model aliran fluida (CFD), model interaksi partikel (DEM), dan kombinasi keduanya. Beberapa penelitian juga menerapkan model matematis berbasis diferensial parsial dan menyederhanakannya menggunakan metode spektral atau metode elemen hingga. Hasil simulasi dibandingkan dengan data eksperimen untuk memperoleh tingkat keakuratan model. Validasi dilakukan dengan menghitung koefisien determinasi (R^2) antara data simulasi dan data eksperimen.

3. Hasil dan Pembahasan

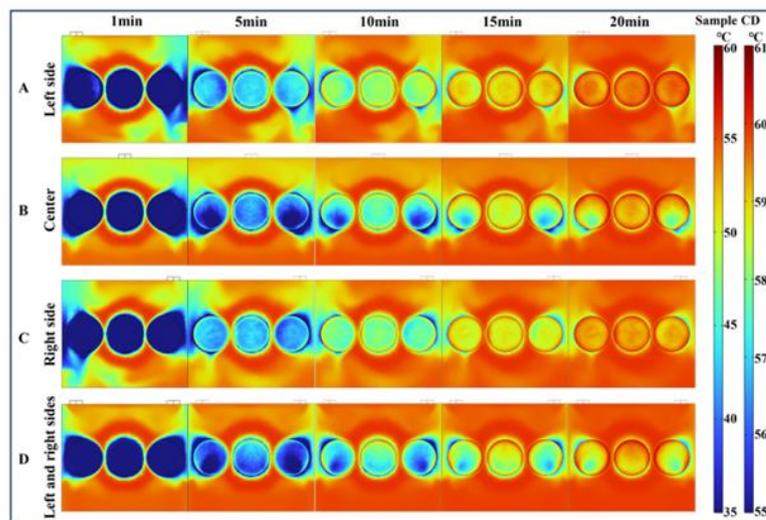
Simulasi numerik telah menunjukkan efektivitasnya dalam menggambarkan proses perpindahan panas dan massa yang kompleks pada sistem pengeringan berbasis udara panas. Tahap awal pengeringan diawali dengan pemanasan material oleh udara panas secara konvektif hingga mencapai suhu wet-bulb, dilanjutkan dengan difusi kelembaban dari bagian dalam material menuju permukaan untuk menguap [1,2]. Laju perpindahan panas dan kelembaban sangat dipengaruhi oleh suhu udara, kelembaban relatif, serta karakteristik termofisik dari bahan yang dikeringkan [3,4].



Gambar.1 a) Perkembangan waktu kelembaban relatif udara keluar secara numerik, dan b) Perkembangan waktu laju pengeringan pada tumpukan serpihan kayu dengan distribusi porositas yang diperbesar di dekat dinding tumpukan.

Salah satu tantangan utama dalam pengeringan konvektif adalah distribusi suhu dan kelembaban yang tidak merata di dalam ruang pengering. Simulasi tiga dimensi pada pengeringan padi menunjukkan bahwa arah aliran udara, posisi inlet dan outlet, serta geometri ruang pengering berpengaruh signifikan terhadap keseragaman suhu [8]. Konfigurasi aliran vertikal memberikan penyebaran panas yang lebih seragam dibandingkan arah horizontal atau diagonal. Ketidakteraturan

aliran udara menyebabkan pembentukan struktur pusaran (vorteks) yang memengaruhi efisiensi pemanasan dan waktu pengeringan total.



Gambar.2 Distribusi suhu dalam ruang pengering pada berbagai konfigurasi posisi outlet udara dengan aliran udara masuk vertikal (VO) pada suhu 60 °C selama proses pengeringan konvektif. A, B, C, dan D menunjukkan bahwa outlet berada di sisi kiri, tengah, kanan, serta sisi kiri dan kanan secara bersamaan [8].

Model gabungan CFD-DEM digunakan dalam simulasi rotary drum dryer untuk mengamati interaksi antara partikel dan fluida panas. Hasil menunjukkan bahwa kecepatan rotasi drum, kemiringan tabung, serta kecepatan udara masuk memengaruhi suhu rata-rata partikel dan waktu tinggalnya dalam sistem [4]. Semakin besar kecepatan udara, suhu partikel meningkat lebih cepat; namun, kecepatan rotasi drum yang terlalu tinggi justru dapat mengurangi waktu tinggal dan menyebabkan pengeringan tidak merata.

Validasi eksperimen diperlukan untuk memastikan akurasi model numerik. Pada pengeringan wortel dan udang, simulasi suhu dan kelembaban menunjukkan kesesuaian tinggi dengan hasil uji coba laboratorium, dengan nilai koefisien determinasi (R^2) lebih dari 0.95 [9,10]. Ini menunjukkan bahwa model numerik yang digunakan dapat merepresentasikan fenomena aktual dengan sangat baik, termasuk fase pengeringan konstan dan fase laju jatuh.

Selain aspek termal dan kelembaban, deformasi fisik material juga mulai diperhitungkan. Dalam pengeringan wortel, misalnya, ketidakseimbangan distribusi suhu dan kelembaban mengakibatkan regangan dan tegangan internal yang dapat menyebabkan penyusutan dan retakan [9]. Temuan ini penting terutama untuk produk hortikultura bernilai tinggi, di mana deformasi memengaruhi kualitas akhir.

Beberapa pendekatan menyederhanakan bentuk geometri produk menjadi silinder atau bola untuk memudahkan perhitungan, namun hal ini menurunkan akurasi prediksi distribusi suhu dan kelembaban internal. Oleh karena itu, pemodelan berbasis geometri realistis, seperti pada simulasi pengeringan udang dan wortel, memberikan hasil yang lebih representatif [9,10]. Studi lain juga menunjukkan bahwa desain pengering harus memperhitungkan tidak hanya suhu udara, tetapi juga arah aliran, posisi ventilasi, dan kecepatan rotasi jika menggunakan sistem bergerak seperti drum atau fluidized bed [4,6,7].

Secara keseluruhan, simulasi numerik yang divalidasi secara eksperimental dapat digunakan untuk merancang sistem pengering yang efisien, mengurangi kebutuhan uji coba fisik yang memakan waktu dan biaya, serta meningkatkan kualitas dan efisiensi proses pengeringan secara keseluruhan [1–10].

4. Kesimpulan

Simulasi numerik terbukti menjadi pendekatan yang sangat efektif dalam memahami dan menganalisis fenomena perpindahan panas dan massa pada proses pengeringan berbasis udara panas. Melalui pemodelan Computational Fluid Dynamics (CFD), Discrete Element Method (DEM), dan kombinasi keduanya (CFD-DEM), berbagai aspek penting dalam proses pengeringan dapat dianalisis secara mendalam, termasuk distribusi suhu, kelembaban, pola aliran udara, serta interaksi partikel dan fluida.

Hasil kajian menunjukkan bahwa efisiensi pengeringan sangat dipengaruhi oleh parameter desain dan operasi, seperti konfigurasi inlet dan outlet udara, kecepatan aliran, suhu udara, geometri ruang pengering, dan sifat fisik material. Distribusi suhu dan kelembaban yang tidak merata sering kali menjadi penyebab utama rendahnya efisiensi proses dan kualitas produk akhir. Simulasi numerik memungkinkan visualisasi fenomena ini secara akurat dan menyediakan data penting untuk perbaikan desain alat pengering.

Validasi eksperimental terhadap hasil simulasi menunjukkan tingkat kecocokan yang tinggi, dengan nilai koefisien determinasi (R^2) umumnya di atas 0,95. Ini menunjukkan bahwa model numerik yang digunakan cukup andal dan dapat

diterapkan dalam skenario nyata. Selain itu, beberapa penelitian juga telah mengintegrasikan analisis deformasi dan tegangan internal akibat proses pengeringan, memberikan kontribusi terhadap prediksi kualitas struktural produk setelah dikeringkan. Dengan mempertimbangkan efisiensi energi, akurasi kontrol mutu, dan fleksibilitas desain, simulasi numerik menjadi alat penting dalam pengembangan teknologi pengeringan modern. Pendekatan ini tidak hanya dapat digunakan untuk skala laboratorium, tetapi juga berpotensi untuk diterapkan dalam desain dan optimasi sistem pengering industri yang kompleks dan berskala besar. Ke depan, integrasi antara pemodelan numerik, data eksperimen, dan kecerdasan buatan diprediksi akan semakin memperkuat kemampuan simulasi sebagai platform pengembangan sistem pengering yang efisien, berkelanjutan, dan presisi tinggi.

5. Daftar Pustaka

- [1] Gasparin S, Dutykh D, Mendes N. A spectral method for solving heat and moisture transfer through consolidated porous media. arXiv preprint arXiv:1902.07775. 2019.
- [2] Skarbalius G, Džiugys A, Misiulis E, Navakas R. Iterative method for fast estimation of convective drying characteristics of biomass. arXiv preprint arXiv:2105.12574. 2021.
- [3] Khan MIH, Welsh Z, Gu Y, Karim MA, Bhandari B. Modelling of simultaneous heat and mass transfer considering the spatial distribution of air velocity during intermittent microwave convective drying. *Int J Heat Mass Transf.* 2020;153:119668.
- [4] Prakotmak P, Rattanamechaiskul C, Junka N. Modeling of multiphase heat transfer and transport behaviors of paddy in rotary drum drying by CFD-DEM. *Case Stud Therm Eng.* 2025;73:106551.
- [5] Akamphon S, Sukkasi S, Sedchaicharn K. An integrated heat-transfer-fluid-dynamics-mass-transfer model for evaluating solar-dryer designs. *J Food Process Preserv.* 2018;e13649.
- [6] Jang J, Arastoopour H. CFD simulation of a pharmaceutical bubbling bed drying process at three different scales. *Powder Technol.* 2014. doi:10.1016/j.powtec.2014.04.054.
- [7] Jaturonglumlert S, Kiatsiriroat T. Heat and mass transfer in combined convective and far-infrared drying of fruit leather. *J Food Eng.* 2010;100(2):254–260.
- [8] Wang C, Pei Y, Mu Z, Fan L, Kong J, Tian G, et al. Simulation analysis of 3-D airflow and temperature uniformity of paddy in a laboratory drying oven. *Foods.* 2024;13(3466):1–23.
- [9] Li Y, Liang M, Li J, Jiang K, Li X, Zheng Z. Simulation and experimental studies of heat-mass transfer and stress-strain in carrots during hot air drying. *Agriculture.* 2025;15(484):1–16.
- [10] Teleken JT, Amorim SM, Rodrigues SSS, de Souza TWP, Ferreira JP, Carciofi BAM. Heat and mass transfer in shrimp hot-air drying: experimental evaluation and numerical simulation. *Foods.* 2025;14(428):1–16.