

SIMULASI NUMERIK CFD-DEM PADA *AGITATED PACKED BED DRYER* PADA MATERIAL BERDENSITAS TINGGI

*Reka Adiyasa Cahyapala¹, 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: rekaadiyasa@students.undip.ac.id

Abstrak

Pengeringan merupakan tahapan penting dalam pemanfaatan biomassa kayu karena kadar air yang tinggi dapat menurunkan efisiensi konversi energi. Studi ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh variasi temperatur inlet terhadap proses pengeringan biomassa kayu dalam sistem *agitated packed bed dryer* menggunakan pendekatan *Computational Fluid Dynamics–Discrete Element Method* (CFD–DEM). Simulasi dilakukan dengan variasi temperatur inlet udara panas sebesar 333 K, 343 K, dan 353 K untuk menganalisis dinamika perpindahan panas dan massa pada skala partikel. Hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan temperatur inlet mempercepat penurunan *moisture content* partikel biomassa akibat meningkatnya *driving force* termal antara fase fluida dan fase padatan. Laju evaporasi tertinggi terjadi pada tahap awal pengeringan dan menurun seiring berkurangnya kandungan air partikel. Agitasi terbukti meningkatkan homogenitas distribusi temperatur dan kelembapan di dalam unggun, meskipun fluktuasi lokal tetap teramati akibat perubahan porositas dan dinamika kontak antar-partikel. Selain itu, koefisien perpindahan panas, bilangan Nusselt, dan bilangan Sherwood menunjukkan peningkatan seiring kenaikan temperatur inlet, namun cenderung mengalami keterbatasan pada kondisi temperatur tertinggi. Studi ini menunjukkan bahwa pendekatan CFD–DEM efektif untuk memahami mekanisme pengeringan biomassa kayu dan dapat digunakan sebagai dasar optimasi kondisi operasi pengeringan.

Kata Kunci: *agitated pecked bed dryer*; biomassa kayu; cfd-dem; pengeringan

Abstract

Drying is a critical stage in the utilization of wood biomass, as high moisture content can significantly reduce energy conversion efficiency. This study aims to evaluate the effect of inlet temperature variation on the drying process of wood biomass in an *agitated packed bed dryer* using a *Computational Fluid Dynamics–Discrete Element Method* (CFD–DEM) approach. Simulations were conducted at inlet air temperatures of 333 K, 343 K, and 353 K to analyze heat and mass transfer dynamics at the particle scale. The simulation results show that increasing the inlet temperature accelerates the reduction of biomass particle moisture content due to an enhanced thermal driving force between the fluid and solid phases. The highest evaporation rate occurs during the early stage of drying and gradually decreases as the moisture content of the particles is reduced. Agitation is shown to improve the homogeneity of temperature and moisture distributions within the bed, although local fluctuations persist due to variations in bed porosity and inter-particle contact dynamics. In addition, the heat transfer coefficient, Nusselt number, and Sherwood number increase with rising inlet temperature but tend to exhibit limitations at the highest temperature condition. These results demonstrate that the CFD–DEM approach is effective for understanding the drying mechanisms of wood biomass and can serve as a basis for optimizing drying operating conditions.

Keywords: *agitated pecked bed dryer*; cfd-dem; drying; wood biomass

1. Pendahuluan

Peningkatan kebutuhan global terhadap energi terbarukan mendorong pemanfaatan biomassa sebagai sumber energi alternatif yang berkelanjutan, di mana proses pengeringan biomassa menjadi tahap krusial dalam rantai biorefinery. Kadar air yang tinggi pada biomassa kayu secara signifikan menurunkan efisiensi konversi energi serta meningkatkan konsumsi energi pada tahap proses lanjutan (Golshan et al., 2020). Namun, karakteristik biomassa kayu yang berpori, bersifat anisotropik secara termal, serta memiliki distribusi kelembapan yang heterogen menyebabkan mekanisme perpindahan

panas dan massa berlangsung secara kompleks dan nonlinier, sehingga sulit dianalisis menggunakan pendekatan eksperimental konvensional (Handayani et al., 2023).

Sistem packed bed dryer banyak digunakan dalam proses pengeringan biomassa karena kesederhanaan desain dan kemampuannya menangani kapasitas material yang besar. Akan tetapi, keterbatasan pencampuran dan terbentuknya gradien temperatur serta kelembapan di dalam unggun sering menyebabkan ketidakhomogenan pengeringan (Szufa et al., 2025). Penambahan mekanisme agitasi dapat meningkatkan homogenitas kontak gas-partikel, namun sekaligus memperumit fenomena hidrodinamika dan termal pada skala butir. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan pemodelan numerik yang mampu merepresentasikan interaksi fluida-partikel secara detail.

Pendekatan Computational Fluid Dynamics–Discrete Element Method (CFD–DEM) telah berkembang sebagai alat numerik yang efektif untuk mensimulasikan kopling dua arah antara fase fluida dan partikel melalui pertukaran momentum, panas, dan massa (Khodabandehlou et al., 2025). Metode ini memungkinkan prediksi parameter kinerja pengeringan seperti laju evaporasi, distribusi temperatur unggun, koefisien perpindahan panas konvektif, serta indikator pencampuran partikel yang berkaitan dengan homogenitas kelembapan akhir produk (Bi et al., 2023). Validasi lintas-skala pada sistem gas–padatan menunjukkan bahwa CFD–DEM mampu merepresentasikan profil temperatur dan kelembapan dengan tingkat kesesuaian yang baik terhadap data eksperimen (Sosnowski et al., 2025).

Temperatur inlet merupakan salah satu parameter operasi utama yang memengaruhi intensitas perpindahan panas dan massa pada sistem pengeringan. Peningkatan temperatur inlet dapat meningkatkan laju evaporasi permukaan, memperbesar koefisien perpindahan panas, serta memperkuat driving force difusi uap air (Zhang et al., 2020). Dalam simulasi CFD–DEM, variasi temperatur inlet memungkinkan analisis temporal terhadap evolusi bilangan Nusselt, Sherwood, serta fluktuasi koefisien perpindahan panas dan massa yang dipengaruhi oleh dinamika interaksi gas–partikel (Wormsbecker et al., 2009). Meskipun demikian, kajian komparatif mengenai pengaruh multi-temperatur inlet terhadap pengeringan partikel biomassa kayu dalam sistem agitated packed bed menggunakan pendekatan CFD–DEM masih relatif terbatas (Tamrakar & Ramachandran, 2019).

Berdasarkan celah penelitian tersebut, penelitian ini bertujuan mengevaluasi pengaruh variasi temperatur inlet terhadap performa pengeringan partikel biomassa kayu melalui simulasi CFD–DEM coupling. Studi ini mengkaji keterkaitan antara hidrodinamika gas–partikel, perpindahan panas konvektif, serta mekanisme penghilangan kelembapan dengan meninjau parameter HTC, Nu, dan Sh, serta distribusi kelembapan relatif. Hasil penelitian diharapkan mampu mengidentifikasi kondisi termal optimum yang menghasilkan efisiensi pengeringan tertinggi sekaligus memberikan kontribusi bagi pengembangan metode simulasi dan optimasi operasi sistem pengeringan biomassa berskala industri (Ren et al., 2025).

2. Metode Penelitian

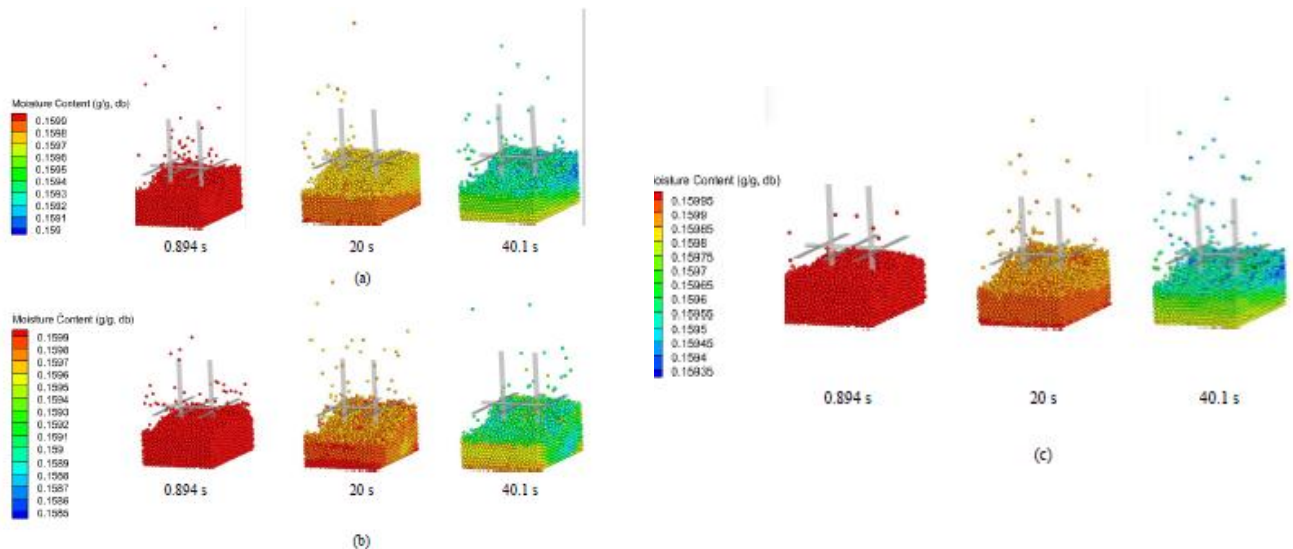
Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah pendekatan simulasi numerik berbasis *Computational Fluid Dynamics–Discrete Element Method* (CFD–DEM) untuk menganalisis proses pengeringan biomassa kayu dalam sistem *agitated packed bed dryer*. Metode ini memungkinkan pemodelan kopling dua arah antara fase fluida dan fase partikel, sehingga interaksi hidrodinamika, perpindahan panas, dan perpindahan massa dapat direpresentasikan secara detail pada skala partikel.

Sistem pengering dimodelkan sebagai packed bed silindris yang dilengkapi mekanisme agitasi dan diisi partikel biomassa kayu berbentuk sferis berdiameter 10 mm. Tahap pre-processing meliputi pembuatan geometri, pembangkitan *mesh poly-hexcore* pada domain fluida, serta proses packing partikel menggunakan pendekatan DEM. Kualitas mesh dievaluasi melalui parameter *skewness* dan *orthogonal quality* untuk memastikan kestabilan numerik simulasi. Fase fluida diselesaikan menggunakan pendekatan Eulerian dengan persamaan konservasi massa, momentum, energi, dan transport spesies uap air, serta model turbulensi k – ϵ standar. Variasi temperatur inlet udara panas ditetapkan pada 333 K, 343 K, dan 353 K, dengan kondisi outlet berupa pressure outlet.

Fase partikel dimodelkan menggunakan *Discrete Element Method* dengan pendekatan *soft sphere*, di mana interaksi kontak antar-partikel dan partikel–dinding direpresentasikan menggunakan model Hertz–Mindlin dengan *sliding* dan *rolling friction*. Gaya hidrodinamika yang bekerja pada partikel meliputi *drag*, *lift*, dan *buoyancy*. Kopling CFD–DEM dilakukan secara *two way coupling* dengan pertukaran informasi porositas, panas, dan massa antar fase. Proses pengeringan partikel dimodelkan menggunakan *Reaction Engineering Approach* (REA). Analisis pasca-proses difokuskan pada evaluasi *moisture content*, koefisien perpindahan panas (HTC), bilangan Nusselt (Nu), bilangan Sherwood (Sh), serta laju evaporasi untuk menentukan kondisi temperatur inlet yang optimum.

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil simulasi CFD–DEM menunjukkan bahwa variasi temperatur inlet udara panas memberikan pengaruh yang signifikan terhadap dinamika perpindahan panas dan massa pada proses pengeringan biomassa kayu dalam sistem *agitated packed bed dryer*. Secara umum, peningkatan temperatur inlet dari 333 K hingga 353 K menghasilkan percepatan penurunan moisture content partikel, yang mencerminkan meningkatnya *driving force* termal antara fase fluida dan fase padatan (Gambar 1). Kondisi ini mempercepat proses evaporasi air bebas pada permukaan partikel, terutama pada tahap awal pengeringan, ketika resistansi internal partikel masih relatif rendah.

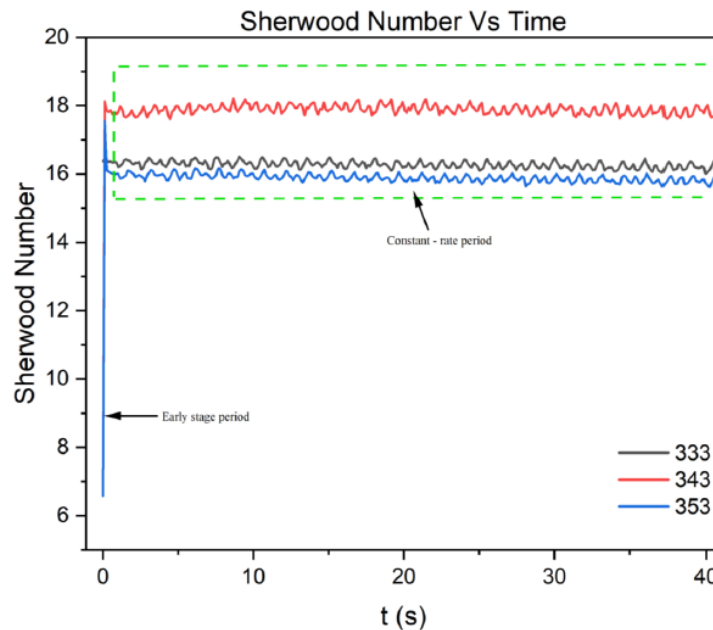


Gambar 1. *Contour Moisture* pada Partikel dengan temperatur (a) 333 K, (b) 343 K, (c) 353 K

Distribusi temperatur dan kelembapan di dalam unggun menunjukkan bahwa mekanisme agitasi berperan penting dalam meningkatkan homogenitas proses pengeringan. Pada temperatur inlet yang lebih tinggi, agitasi memperkuat pencampuran partikel dan memperbaiki distribusi aliran gas, sehingga gradien temperatur dan kelembapan antar zona unggun menjadi lebih kecil. Namun demikian, fluktuasi lokal masih teramati akibat perubahan porositas unggun secara temporal dan dinamika kontak antar-partikel. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun agitasi mampu meningkatkan homogenitas secara makroskopik, fenomena heterogenitas pada skala partikel tetap berpengaruh terhadap efektivitas pengeringan.

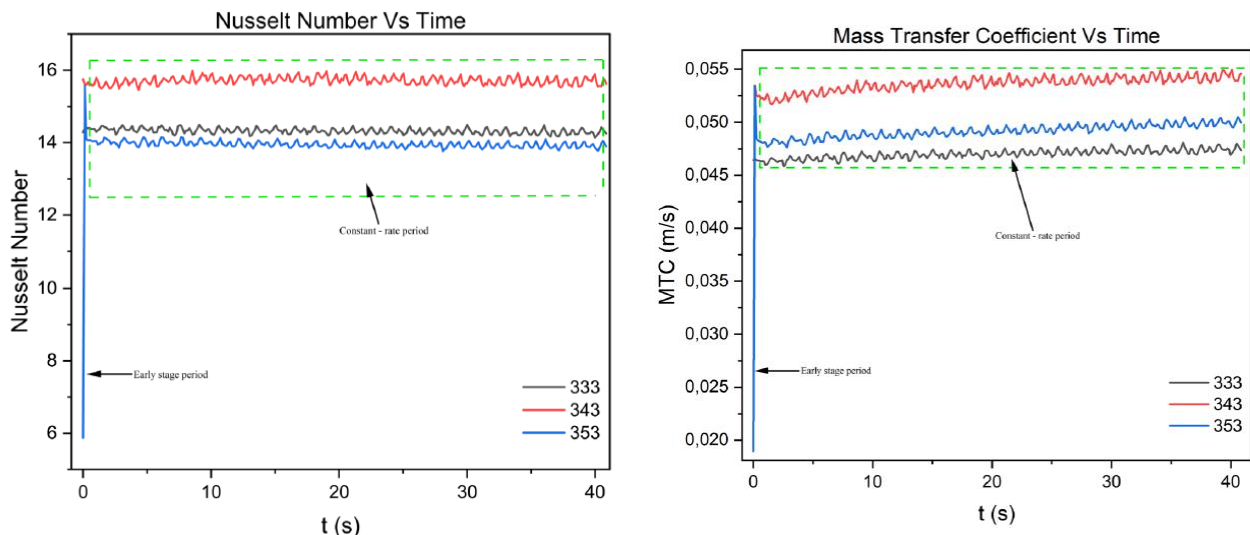
Fenomena ini dapat dijelaskan dengan analisa mekanisme perpindahan massa pada skala partikel. Dari perspektif perpindahan massa, kita bisa melihat dari bilangan non-dimensional sherwood pada Gambar 2, dimana bilangan tersebut mengkarakterisasi efisiensi perpindahan masa dari permukaan partikel ke bulk fluid. Pada Gambar 2, terlihat penurunan Sherwood number pada temperatur 353 K dibandingkan 343 K sebesar 12,2% meskipun temperatur lebih tinggi seharusnya memberikan keuntungan dalam properties fluida (viscosity yang rendah, diffusivitas tinggi), Sherwood number yang lebih rendah justru menunjukkan adanya negasi dari keuntungan tersebut dikarenakan udara sudah terlalu banyak menyerap uap dari partikel lain, sehingga *driving force* atau ‘kekuatan tarik’ nya terhadap uap dari partikel berkurang signifikan (K. Chen et al., 2024). Laju evaporasi yang tinggi pada permukaan partikel di kondisi 353 K mengakibatkan peningkatan moisture content dalam udara pengering yang berasal dari rongga inter-particle dalam packed bed. Peningkatan moisture content ini mengurangi konsentrasi gradient uap ($\Delta C = C_{surface} - C_{air}$) antar permukaan partikel yang jenuh dengan uap air dan udara, yang merupakan faktor pendorong untuk perpindahan massa (Garcia-Llobodanin & Billiris, 2023). Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa drying rate dapat berkurang hingga 45% ketika relative humidity naik dari 50% menjadi 80% pada temperatur yang identik, hal tersebut mengkonfirmasi bahwa akumulasi kelembapan dalam packed bed dapat secara signifikan mengurangi laju evaporasi meskipun temperatur meningkat (Chanpet et al., 2020) (Skarbalius et al., 2022).

Selain akumulasi uap air dalam udara, mekanisme lain yang berkontribusi pada penurunan performa pengeringan di 353 K adalah potensi terjadinya pengerasan permukaan partikel (*case hardening*). Pada temperatur tinggi, permukaan partikel dapat mengalami pengeringan cepat yang menciptakan lapisan keras yang bisa menghambat difusi uap air dari inti partikel ke permukaan.



Gambar 2. Grafik *Sherwood Number vs Time*

Analisis parameter perpindahan panas mengindikasikan bahwa koefisien perpindahan panas (HTC) dan bilangan Nusselt (Nu) meningkat seiring kenaikan temperatur inlet. Peningkatan ini berkaitan dengan intensifikasi konveksi akibat perbedaan temperatur yang lebih besar serta peningkatan kecepatan aliran gas efektif di sekitar partikel. Di sisi lain, bilangan Sherwood (Sh) juga mengalami peningkatan, yang menandakan meningkatnya efisiensi transport uap air dari permukaan partikel ke fase gas. Namun, pada temperatur inlet tertinggi, laju peningkatan Sh cenderung menurun, yang mengindikasikan mulai terbatasnya proses perpindahan massa akibat akumulasi uap air di dalam unggun dan berkurangnya gradien konsentrasi.



Gambar 3. (a) *Nusselt Number vs Time*, (b) Grafik *MTC vs Time*

Kopling dua arah antara fase fluida dan fase partikel dalam simulasi CFD–DEM memperlihatkan bahwa variasi porositas lokal dan gaya hidrodinamika memiliki peran penting dalam mengontrol performa pengeringan. Perubahan struktur unggun akibat agitasi menyebabkan fluktuasi gaya drag dan distribusi aliran gas, yang secara langsung memengaruhi laju perpindahan panas dan massa secara temporal. Temuan ini menunjukkan bahwa asumsi unggun homogen berpotensi menghasilkan estimasi kinerja yang kurang akurat pada sistem pengering beragitasi.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menegaskan bahwa peningkatan temperatur inlet merupakan strategi efektif untuk meningkatkan laju dan efisiensi pengeringan biomassa kayu, tetapi perlu dioptimalkan untuk menghindari keterbatasan transport massa pada kondisi temperatur tinggi. Pendekatan CFD–DEM terbukti mampu memberikan pemahaman komprehensif terhadap mekanisme pengeringan pada skala partikel, serta dapat digunakan sebagai dasar dalam optimasi desain dan kondisi operasi sistem pengering biomassa berskala industri.

4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil menganalisis pengaruh variasi temperatur inlet terhadap proses pengeringan biomassa kayu dalam sistem *agitated packed bed dryer* menggunakan pendekatan simulasi *Computational Fluid Dynamics–Discrete Element Method* (CFD–DEM). Hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan temperatur inlet dari 333 K hingga 353 K memberikan pengaruh signifikan terhadap dinamika perpindahan panas dan massa. Kenaikan temperatur inlet secara konsisten mempercepat penurunan moisture content partikel biomassa, yang mencerminkan meningkatnya *driving force* termal antara fase fluida dan fase padatan. Kondisi ini mempercepat proses evaporasi air bebas pada permukaan partikel, terutama pada tahap awal pengeringan ketika resistansi internal partikel masih relatif rendah.

Mekanisme agitasi terbukti berperan penting dalam meningkatkan homogenitas distribusi temperatur dan kelembapan di dalam unggun. Agitasi memperbaiki pencampuran partikel dan distribusi aliran gas, sehingga gradien temperatur dan kelembapan antar zona unggun dapat dikurangi. Meskipun demikian, hasil simulasi juga menunjukkan adanya fluktuasi lokal yang dipengaruhi oleh perubahan porositas unggun dan dinamika kontak antar-partikel selama proses pengeringan berlangsung. Fenomena ini menegaskan bahwa sistem pengering beragitasi tetap menunjukkan heterogenitas pada skala partikel, sehingga asumsi unggun homogen berpotensi menghasilkan estimasi kinerja yang kurang akurat.

Analisis parameter perpindahan panas dan massa menunjukkan bahwa koefisien perpindahan panas (HTC), bilangan Nusselt (Nu), dan bilangan Sherwood (Sh) meningkat seiring kenaikan temperatur inlet, yang menandakan intensifikasi mekanisme konveksi panas dan transport massa. Namun, pada temperatur inlet tertinggi, laju peningkatan parameter tersebut cenderung menurun akibat keterbatasan transport massa yang ditandai oleh akumulasi uap air di dalam unggun. Oleh karena itu, meskipun temperatur inlet tinggi efektif dalam meningkatkan laju pengeringan, penentuan kondisi operasi yang optimum tetap diperlukan. Secara keseluruhan, pendekatan CFD–DEM mampu memberikan pemahaman yang komprehensif terhadap mekanisme pengeringan biomassa kayu pada skala partikel dan dapat dijadikan dasar dalam optimasi desain serta kondisi operasi sistem pengering biomassa.

5. Daftar Pustaka

- [1] Akbari Fakhrabadi, E., Stickel, J. J., & Liberatore, M. W. (2022). Frictional contacts between individual woody biomass particles under wet and dry conditions. *Powder Technology*, 408. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117719>
- [2] Bi, D., Kong, R., Liu, S., He, J., Sun, H., & Yao, D. (2023). CFD-DEM investigation of the flow characteristic of biomass particles and heat carrier in a novel V-shaped down-tube pyrolysis reactor. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 149. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2023.107132>
- [3] Chen, D., Zheng, Y., & Zhu, X. (2012). Determination of effective moisture diffusivity and drying kinetics for poplar sawdust by thermogravimetric analysis under isothermal condition. *Bioresource Technology*, 107, 451–455. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.12.032>
- [4] Cui, P., Yu, Y., Xue, Q., Wu, Z., Miao, K., Liu, C., Zhao, L., & Li, Z. (2023). Numerical simulation and optimization of *Lonicerae Japonicae* Flos extract spray drying process based on temperature field verification and deep reinforcement learning. *Journal of Food Engineering*, 345. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2023.111425>
- [5] Fang, X., Qi, B., Liu, J., Markthaler, S., Elhaus, N., & Karl, J. (2025). Particle-resolved computational fluid dynamics simulation of the heat transfer in fixed-bed reactors for heterogeneous catalysis: A review. In *International Journal of Heat and Mass Transfer* (Vol. 250). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2025.127311>
- [6] Golshan, S., Sotudeh-Gharebagh, R., Zarghami, R., Mostoufi, N., Blais, B., & Kuipers, J. A. M. (2020). Review and implementation of CFD-DEM applied to chemical process systems. In *Chemical Engineering Science* (Vol. 221). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.115646>
- [7] Handayani, S. U., Wahyudi, H., Agustina, S., Yulianto, M. E., & Aryanto, H. D. (2023). CFD-DEM Study of heat and mass transfer of ellipsoidal particles in fluidized bed dryers. In *Powder Technology* (Vol. 425). <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118535>
- [8] Izquierdo-Barrientos, M. A., Sobrino, C., & Almendros-Ibáñez, J. A. (2016). Modeling the Heat Transfer Coefficient between a Surface and Fixed and Fluidized Beds with Phase Change Material. *Journal of Heat Transfer*, 138(7). <https://doi.org/10.1115/1.4032981>
- [9] Jervell, V. G., Gjennestad, M. A., Trinh, T. T., & Wilhelmsen, Ø. (2024). The influence of thermal diffusion on water migration through a porous insulation material. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 227. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125576>
- [10] Khodabandehlou, R., Norouzi, H. R., Larimi, A., & Mostoufi, N. (2025). Analysis of biomass gasification in a fluidized bed using CFD-DEM. *Energy*, 320. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.135395>
- [11] Ren, J., & Kloker, M. (2022). Non-ideal gas behavior matters in hydrodynamic instability. *Scientific Reports*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-26629-6>

-
- [12] Sosnowski, M., Krzywanski, J., Grabowska, K., Zylka, A., Kulakowska, A., Skrobek, D., & Szudarek, M. (2025). Two-way coupled CFD-DEM model of a Disc-Shaped fluidized sorption reactor operating at low-pressure regimes. *Applied Thermal Engineering*, 266. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.125600>
 - [13] Szufa, S., Unyay, H., Pakowski, Z., Piersa, P., Siczek, K., Kabaciński, M., Sobek, S., Moj, K., Likożar, B., Kostyniuk, A., & Junga, R. (2025). Batch rolling-bed dryer applicability for drying biomass prior to torrefaction. *Renewable Energy*, 239. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.122106>
 - [14] Tamrakar, A., & Ramachandran, R. (2019). CFD–DEM–PBM coupled model development and validation of a 3D top-spray fluidized bed wet granulation process. *Computers and Chemical Engineering*, 125, 249–270. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2019.01.023>
 - [15] Zhang, Y., & Li, L. (2024). Optimization of Discrete Element Method Model to Obtain Stable and Reliable Numerical Results of Mechanical Response of Granular Materials. *Minerals*, 14(8). <https://doi.org/10.3390/min14080758>