

OPTIMASI DESAIN MESIN SANGRAI KOPI KAPASITAS 1 KG MENGUNAKAN SIMULASI NUMERIK PADA VARIASI MATERIAL DRUM, KETEBALAN DINDING, DAN BILAH PENGADUK

Krisdiyanto^{1*}, Rela Adi Himarosa², Djuwanda Kristianto³, Zhang Jieshu⁴

^{1,2,3}) Jurusan Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Yogyakarta 55183, Indonesia

⁴) CPDM, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Universiti Malaya,
Kuala Lumpur 50603, Malaysia

*Email: krisdiyanto@umy.ac.id

ABSTRAK

Kinerja mesin sangrai kopi skala kecil ditentukan oleh interaksi antara karakteristik termal drum dan mekanisme pengadukan biji. Namun, kajian sebelumnya masih cenderung menilai aspek perpindahan panas dan pergerakan biji secara terpisah, sehingga optimasi desain yang mengintegrasikan material drum, ketebalan dinding, dan konfigurasi bilah pengaduk dalam satu kerangka simulasi masih terbatas. Penelitian ini bertujuan mengoptimasi desain mesin sangrai kopi kapasitas 1 kg menggunakan pendekatan gabungan Computational Fluid Dynamics (CFD) dan Discrete Element Method (DEM). Kriteria optimasi ditetapkan berdasarkan respons dan kestabilan distribusi panas di dalam drum, kecenderungan munculnya hot spot, serta homogenitas pembalikan biji selama proses sangrai. Simulasi CFD digunakan untuk mengevaluasi pengaruh variasi material drum dan ketebalan dinding, sedangkan simulasi DEM digunakan untuk membandingkan konfigurasi bilah pengaduk terhadap pola gerak biji. Hasil menunjukkan bahwa besi cor memberikan respons pemanasan lebih tinggi, tetapi desain optimum tidak ditentukan oleh suhu tertinggi semata. Dengan mempertimbangkan kestabilan distribusi panas, kesesuaian material food-grade, dan kerataan pergerakan biji, konfigurasi drum SS 304 tebal 4 mm dengan enam bilah pengaduk memberikan performa paling seimbang. Temuan ini menunjukkan bahwa pendekatan CFD-DEM efektif digunakan untuk mendukung optimasi desain mesin sangrai kopi kapasitas kecil agar lebih stabil secara termal dan lebih merata dalam pengadukan.

Kata Kunci : mesin sangrai kopi, optimasi desain, perpindahan panas, CFD-DEM, bilah pengaduk.

ABSTRACT

Small-scale coffee roasting machine performance is determined by the interaction between the drum's thermal characteristics and the bean agitation mechanism. However, previous studies have tended to examine heat transfer and bean movement separately, so design optimization that integrates drum material, wall thickness, and stirring blade configuration within a single simulation framework remains limited. This study aims to optimize the design of a 1 kg capacity coffee roasting machine using a coupled Computational Fluid Dynamics (CFD) and Discrete Element Method (DEM) approach. The optimization criteria were defined based on the response and stability of heat distribution inside the drum, the tendency for hot spot formation, and the uniformity of bean turnover during roasting. CFD simulation was used to evaluate the effects of drum material and wall thickness variations, while DEM simulation was used to compare stirring blade configurations in terms of bean movement patterns. The results showed that cast iron provided a higher heating response, but the optimum design was not determined solely by the highest temperature. By considering heat distribution stability, the suitability of food-grade materials, and the uniformity of bean movement, the 4 mm SS 304 drum with six stirring blades delivered the most balanced performance. These findings indicate that the CFD-DEM approach is effective for supporting the design optimization of small-capacity coffee roasting machines to achieve better thermal stability and more uniform agitation.

Keywords : coffee roasting machine, design optimization, heat transfer, CFD-DEM, stirring blade configuration.

1. PENDAHULUAN

Penyangraian kopi merupakan proses termal yang kompleks karena melibatkan perpindahan panas dan massa, perubahan sifat fisik biji, serta dinamika pergerakan partikel selama proses berlangsung. Pada mesin sangrai tipe drum, mutu hasil roasting tidak hanya ditentukan oleh suhu pemanasan, tetapi juga oleh karakteristik material drum, ketebalan dinding, konfigurasi internal, dan mekanisme pengadukan yang memengaruhi distribusi panas serta pemerataan gerak biji di dalam tabung (Al-Shemmeri et al., 2025; Puntuwanit et al., 2025; de Carvalho et al., 2025; He et al., 2025). Kajian numerik dan eksperimental sebelumnya juga menunjukkan bahwa perpindahan panas pada roasting kopi sangat dipengaruhi oleh geometri alat, kondisi operasi, dan interaksi biji dengan dinding drum maupun aliran udara panas (Fabbri et al., 2011; Bottazzi et al., 2012; Sachak-Patwa et al., 2019; Debona et al., 2022).

Dalam beberapa tahun terakhir, simulasi numerik semakin banyak digunakan dalam rekayasa pangan karena mampu menjelaskan distribusi temperatur, pola aliran fluida, dan interaksi multiphase yang sulit diamati secara langsung melalui eksperimen konvensional. Computational Fluid Dynamics (CFD) telah banyak dimanfaatkan untuk menganalisis distribusi panas dan aliran udara pada proses termal, sedangkan pendekatan berbasis partikel digunakan untuk memahami perilaku bahan granular pada sistem drum berputar (Szpicier et al., 2025; Rivera and Jaeger, 2025; Li et al., 2025). Pada sistem kopi, penelitian telah berkembang dari pemodelan perpindahan panas dan massa selama roasting hingga pengamatan gerak biji dalam rotating drum, yang menunjukkan bahwa dinamika partikel berpengaruh langsung terhadap efektivitas transfer panas dan keseragaman proses (Al-Shemmeri et al., 2023; Resende et al., 2017).

Meskipun demikian, sebagian besar penelitian tentang kopi masih berfokus pada kinetika proses, mutu sensori, efisiensi energi, atau performa roasting secara umum, sedangkan penelitian tentang optimasi desain mesin sangrai kopi skala kecil yang secara simultan mengintegrasikan material drum, ketebalan dinding, dan konfigurasi bilah pengaduk masih terbatas (Puntuwanit et al., 2025; Rahayuningtyas et al., 2024; Al-Ghamdi et al.,

2024). Di sisi lain, studi CFD/DEM yang berkembang pada rotary drum umumnya banyak diterapkan pada pengeringan, kiln, moving bed, atau sistem granular non-kopi, sehingga belum secara langsung menjawab kebutuhan desain roaster kopi skala kecil berbahan food-grade dengan target kestabilan termal dan pemerataan pembalikan biji yang tinggi (He et al., 2025; Jiang et al., 2024; Chen et al., 2025; Zhang et al., 2025; Fries, 2021). Bahkan pada studi rotary drum kopi yang lebih mutakhir, fokus penelitian masih cenderung pada performa proses atau dimensi alat, belum pada integrasi respons termal drum dan homogenitas gerak biji sebagai dasar optimasi desain (de Carvalho et al., 2025).

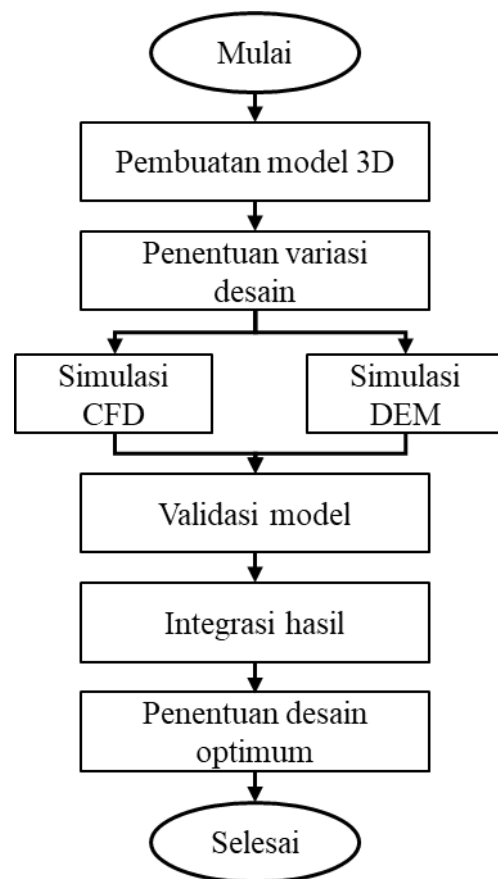
Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini memfokuskan pada tiga rumusan masalah, yaitu bagaimana pengaruh variasi material drum dan ketebalan dinding terhadap distribusi suhu di dalam drum, bagaimana pengaruh konfigurasi bilah pengaduk terhadap kerataan pembalikan biji, dan bagaimana kedua aspek tersebut dapat diintegrasikan untuk menentukan desain mesin sangrai kopi kapasitas 1 kg yang paling optimum. Dengan demikian, gap penelitian terletak pada belum banyaknya kajian yang menghubungkan evaluasi termal dan perilaku partikel secara simultan dalam satu kerangka optimasi desain roaster kopi skala kecil.

Novelty penelitian ini terletak pada penerapan pendekatan gabungan CFD–DEM untuk mengevaluasi secara bersamaan tiga variabel desain utama, yaitu material drum, ketebalan dinding, dan konfigurasi bilah pengaduk, pada mesin sangrai kopi kapasitas 1 kg. Berbeda dari penelitian terdahulu yang umumnya menelaah aspek termal atau dinamika partikel secara terpisah, penelitian ini mengintegrasikan keduanya sebagai dasar penentuan desain optimum. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan mengoptimasi desain mesin sangrai kopi kapasitas 1 kg melalui simulasi numerik berbasis CFD–DEM dengan menilai respons distribusi panas di dalam drum dan homogenitas pembalikan biji, sehingga diharapkan dapat memberikan kontribusi pada pengembangan roaster kopi skala kecil yang lebih stabil secara termal, lebih merata dalam pengadukan, dan lebih rasional dari sudut pandang rekayasa desain berbasis simulasi (Szpicier et al., 2025; Rivera and Jaeger, 2025).

2. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan rancangan eksperimen numerik komparatif untuk mengevaluasi pengaruh variasi material drum, ketebalan dinding, dan konfigurasi bilah pengaduk terhadap distribusi suhu dan kerataan pergerakan biji pada mesin sangrai kopi kapasitas 1 kg. Objek penelitian berupa model digital tiga dimensi mesin sangrai kopi yang dianalisis menggunakan pendekatan gabungan Computational Fluid Dynamics (CFD) dan Discrete Element Method (DEM). Pemanfaatan CFD dan simulasi partikel pada rekayasa pangan dinilai efektif untuk menghubungkan desain alat dengan perilaku proses yang sulit diamati secara langsung, sehingga sesuai untuk optimasi desain alat termal berbasis drum (Szpicer et al., 2025a; Rivera and Jaeger, 2025; Szpicer et al., 2023; Yang et al., 2024).

Tahapan penelitian meliputi studi literatur, pembuatan model tiga dimensi, penetapan variasi desain, simulasi CFD, simulasi DEM, validasi model, dan integrasi hasil untuk penentuan desain optimum. Alur penelitian disajikan pada Gambar 1. Model alat dibuat menggunakan Autodesk Inventor 2020 x64 Edition, simulasi termal dilakukan menggunakan Autodesk CFD 2019, dan simulasi gerak partikel dilakukan menggunakan ANSYS Rocky-DEM. Seluruh komputasi dijalankan pada laptop dengan sistem operasi Windows 10 Home Single Language, prosesor Intel Core i7-7700HQ 2.80 GHz, RAM 16 GB, dan sistem operasi 64-bit. Penggunaan perangkat lunak yang berbeda dilakukan agar distribusi suhu dan perilaku granular dianalisis dengan pendekatan yang paling sesuai, sebagaimana direkomendasikan pada studi optimasi alat pangan berbasis simulasi (Rivera and Jaeger, 2025; Szpicer et al., 2025b).



Gambar 1. Diagram alir penelitian

Variabel penelitian diringkas pada Tabel 1. Variasi desain terdiri atas empat jenis drum, yaitu SS 304 tebal 4 mm, SS 304 tebal 6 mm, besi cor tebal 4 mm, dan besi cor tebal 6 mm. Selain itu, dua konfigurasi bilah pengaduk diuji, yaitu empat bilah dan enam bilah. Drum dirancang untuk kapasitas 1 kg dengan diameter luar 224 mm dan tinggi 230 mm. Pada bagian tengah drum dibuat lubang poros berdiameter 20 mm, sedangkan pada bagian belakang terdapat lubang sirkulasi udara berdiameter 4 mm. Variasi geometri internal ini penting karena struktur seperti flight, baffle, dan elemen pengangkat partikel diketahui berpengaruh langsung terhadap pola gerak material dan kapasitas pertukaran panas dalam rotary drum (He et al., 2025; Berkinova et al., 2025; Zhang et al., 2025).

Tabel 1. Variabel dan parameter penelitian

Aspek	Parameter
Material drum	SS 304, besi cor
Ketebalan drum	4 mm, 6 mm
Konfigurasi bilah pengaduk	4 bilah, 6 bilah
Diameter luar drum	224 mm
Tinggi drum	230 mm

Aspek	Parameter
Diameter lubang poros	20 mm
Diameter lubang sirkulasi belakang	4 mm
Putaran drum	70 rpm
Suhu awal sistem	28°C
Temperatur sumber panas CFD	550°C
Kecepatan udara panas masuk	1,4 m/s
Kecepatan aliran pada tutup belakang	2 m/s
Durasi simulasi CFD	300 detik
Time step CFD	5 detik
Inner iteration CFD	2
Massa biji pada DEM	0,75 kg
Jumlah partikel DEM	710 biji
Durasi simulasi DEM	3,5 detik
Interval iterasi/output DEM	0,1 detik

Spesifikasi material yang digunakan pada model disajikan pada Tabel 2. SS 304 dimodelkan dengan massa jenis 7,99 g/cc dan konduktivitas termal 14 W/m·K, sedangkan besi cor dimodelkan dengan konduktivitas termal 52 W/m·K. Perbedaan sifat termal ini menjadi dasar pengujian karena material dengan konduktivitas lebih tinggi secara teoritis akan memberikan respons pemanasan yang lebih cepat, meskipun tidak selalu menghasilkan distribusi suhu yang paling seragam. Dalam studi rotary drum dan proses termal pangan, sifat material terbukti berpengaruh nyata terhadap respons termal dan efektivitas pertukaran panas di dalam alat (He et al., 2025; Zhang et al., 2025; Fabbri et al., 2011; Bottazzi et al., 2012).

Table 2. Material property dari mesin sangrai

Sifat material	SS 304	Besi cor
Kekuatan tarik (MPa)	505	757
Kekuatan luluh (MPa)	215	884
Modulus elastisitas (GPa)	195	120
Rasio Poisson	0,29	0,30
Modulus geser (GPa)	86	58

Sifat material	SS 304	Besi cor
Konduktivitas termal (W/m·K)	14	52

Pada simulasi CFD, domain fluida dimodelkan sebagai udara dengan analisis tiga dimensi, transient, dan aliran paksa. Pembakaran tidak dimodelkan secara eksplisit, tetapi direpresentasikan sebagai udara panas yang masuk dari sisi bawah domain dengan temperatur 550°C dan kecepatan 1,4 m/s. Pada sisi belakang drum diterapkan aliran 2 m/s untuk merepresentasikan efek aliran akibat rotasi drum. Seluruh domain dan drum diberi suhu awal 28°C, sedangkan drum diasumsikan berputar pada 70 rpm. Kondisi batas dan asumsi model dirangkum pada Tabel 3. Penetapan parameter ini dilakukan agar semua variasi material dan ketebalan dibandingkan pada kondisi operasi yang sama. Pendekatan semacam ini umum digunakan pada studi roasting dan proses termal pangan untuk mengevaluasi pengaruh konfigurasi alat terhadap distribusi panas dan efektivitas transfer panas (Al-Shemmeri et al., 2025; de Carvalho et al., 2025; Szpicer et al., 2025a).

Table 3. Asumsi model dan boundary condition simulasi

Aspek	Parameter
Jenis analisis CFD	3D transient
Jenis fluida	Udara
Karakter aliran	Forced convection
Sifat fluida	Diasumsikan homogen dan inkompresibel
Temperatur awal domain	28°C
Inlet panas bawah	550°C; 1,4 m/s
Aliran pada sisi belakang	2 m/s
Kecepatan rotasi drum	70 rpm
Durasi simulasi CFD	300 detik
Time step CFD	5 detik
Inner iteration	2
Kondisi dinding	No-slip; interaksi termal mengikuti sifat material masing-masing
Asumsi DEM	Biji kopi diasumsikan kering, tidak pecah, tidak berubah

Aspek	Parameter
	massa, dan tidak mengalami reaksi roasting
Bentuk partikel DEM	Sphero-polygon
Output utama CFD	Distribusi suhu, hot spot, suhu rata-rata udara
Output utama DEM	Frekuensi pembalikan, distribusi gerak partikel
Komponen	Deskripsi

Pada simulasi DEM, analisis difokuskan pada pengaruh bentuk bilah pengaduk terhadap kerataan pembalikan biji. Simulasi dilakukan pada model drum berbahan SS 304 tebal 4 mm sebagai basis pembanding dua konfigurasi pengaduk. Massa biji kopi ditetapkan sebesar 0,75 kg dengan jumlah 710 partikel. Drum berputar pada 70 rpm. Bentuk biji disederhanakan sebagai sphero-polygon agar tetap mendekati geometri biji kopi asli, namun masih efisien secara komputasi. Simulasi dijalankan selama 3,5 detik dengan interval iterasi 0,1 detik. Data yang diambil meliputi jumlah pembalikan biji, distribusi frekuensi pembalikan, dan pola kerataan gerak partikel. Penggunaan DEM pada tahap ini ditujukan untuk mengevaluasi kemampuan bilah pengaduk dalam membalik biji secara merata, bukan sekadar memindahkan partikel di dalam drum. Kajian terbaru menunjukkan bahwa kecepatan rotasi, bentuk partikel, dan geometri internal rotary drum sangat memengaruhi kualitas pencampuran serta distribusi gerak partikel (Berkinova et al., 2025; He et al., 2025; Resende et al., 2017; Al-Shemmeri et al., 2023).

Validasi model pada penelitian ini dilakukan dalam dua tahap, yaitu verifikasi numerik dan validasi sekunder terhadap literatur. Verifikasi numerik dilakukan dengan memastikan bahwa seluruh variasi dibandingkan menggunakan geometri dasar, kondisi batas, dan parameter waktu yang sama, sehingga perbedaan keluaran hanya berasal dari perubahan variabel desain. Validasi sekunder dilakukan dengan membandingkan kecenderungan hasil simulasi terhadap temuan-temuan pada literatur terkait roasting kopi dan rotary drum. Pada aspek termal, model dianggap

konsisten apabila material dengan konduktivitas termal lebih tinggi menunjukkan respons pemanasan yang lebih cepat, sebagaimana dilaporkan pada studi roasting kopi dan drum termal (Fabbri et al., 2011; Bottazzi et al., 2012; Al-Shemmeri et al., 2025; de Carvalho et al., 2025). Pada aspek partikel, model dianggap konsisten apabila perubahan geometri internal dan putaran drum memengaruhi pola pencampuran dan distribusi gerak biji, sebagaimana ditunjukkan pada studi dinamika partikel dalam rotary drum (Resende et al., 2017; Al-Shemmeri et al., 2023; Berkinova et al., 2025; He et al., 2025). Ringkasan prosedur validasi disajikan pada Tabel 4. Validasi eksperimental langsung terhadap prototipe fisik belum dilakukan pada tahap ini, sehingga hal tersebut dinyatakan sebagai keterbatasan penelitian.

Tabel 4. Ringkasan validasi model

Aspek	Pendekatan Validasi	Indikator Kesesuaian
CFD	Perbandingan tren hasil simulasi dengan literatur roasting/drum termal	Material dengan konduktivitas lebih tinggi menunjukkan respons pemanasan lebih cepat
DEM	Perbandingan pola gerak partikel dengan literatur rotary drum	Perubahan geometri bilah dan putaran memengaruhi pembalikan serta pencampuran partikel
Konsistensi numerik	Penyamaan geometri dasar, kondisi batas, dan parameter waktu pada semua skenario	Output antarskenario dapat dibandingkan secara objektif
Keterbatasan	Belum ada validasi eksperimental langsung	Dicantumkan sebagai batasan studi

Teknik analisis data dilakukan secara deskriptif-kuantitatif dan komparatif. Pada analisis CFD, setiap varian dibandingkan berdasarkan suhu rata-rata udara di dalam drum, pola sebaran temperatur, serta kecenderungan

kemunculan hot spot. Pada analisis DEM, kinerja dua konfigurasi pengaduk dibandingkan berdasarkan distribusi frekuensi pembalikan biji pada tiga kelompok, yaitu 1–6 kali, 7–12 kali, dan 13–20 kali pembalikan. Konfigurasi bilah dinilai lebih baik apabila menghasilkan distribusi pembalikan yang lebih merata dan mengurangi dominasi biji yang terlalu sering atau terlalu jarang terbalik. Pada tahap akhir, hasil simulasi CFD dan DEM diintegrasikan untuk menentukan konfigurasi desain paling baik. Pendekatan integratif seperti ini dianjurkan dalam optimasi proses pangan modern karena mampu menghubungkan perilaku alat, distribusi panas, dan mutu proses secara lebih menyeluruh (Rivera and Jaeger, 2025; Szpicer et al., 2025b).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil Perancangan dan Pemodelan Mesin Sangrai Kopi

Tahap awal penelitian menghasilkan rancangan mesin sangrai kopi kapasitas 1 kg dalam bentuk model dua dimensi dan tiga dimensi. Mesin yang dirancang tersusun atas rangka bawah, rangka atas, tabung sangrai, penutup tabung, sistem pemutar, jalur pembakaran, dan ruang kontrol. Secara keseluruhan, dimensi mesin adalah 672 mm × 560 mm × 846 mm, sedangkan tabung sangrai utama memiliki diameter luar 224 mm dan tinggi 230 mm. Variasi ketebalan drum ditetapkan 4 mm dan 6 mm agar pengaruhnya terhadap distribusi suhu dapat dianalisis secara numerik pada tahap berikutnya.

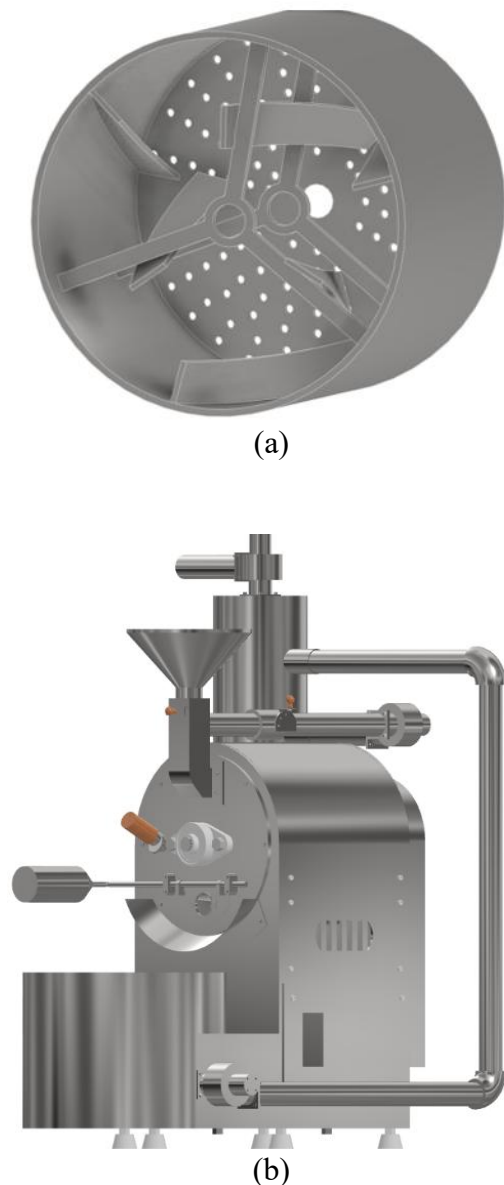
Dari hasil perancangan terlihat bahwa konfigurasi alat telah memenuhi fungsi dasar sebuah mesin sangrai skala kecil, yaitu mampu mengintegrasikan ruang pemanasan, ruang putar, dan sistem pengadukan dalam satu konstruksi yang ringkas. Rangka bawah berfungsi sebagai struktur penopang utama, sedangkan rangka atas dirancang sebagaiudukan tabung dan motor penggerak. Susunan komponen utama tersebut dapat dilihat pada Tabel 4. Dari sudut pandang rekayasa alat, hasil perancangan ini menunjukkan bahwa desain tidak hanya mempertimbangkan bentuk geometrik, tetapi juga stabilitas struktur, kemudahan perakitan, dan kesinambungan fungsi antarbagian. Pendekatan seperti ini sejalan dengan kecenderungan pengembangan

alat proses termal modern yang menempatkan geometri sebagai bagian penting dari performa operasi, bukan sekadar bentuk fisik alat (Arpaci, Atayilmaz and Gemici, 2025; Wang *et al.*, 2025a).

Tabel 4. Rincian material, ukuran, dan jumlah rangka mesin sangrai kopi kapasitas 1 kg

Material	Ukuran (mm)	Jumlah
Besi Hollow 30 x 30	220 mm	2
Besi Hollow 30 x 30	254 mm	2
Plat baja 6 mm	536 mm x 280 mm	2
Plat baja 3 mm	30 mm x 353 mm	4
Tutup atas tabung	Ø280 x 245 mm	1
Tutup kompor	242 mm x 131 mm	2
Jalur gas	242 mm x 155 mm	1
Tutup PLC	242 mm x 169 mm	1

Geometri tabung dan penutup tabung juga dirancang untuk mendukung proses operasi secara menyeluruh. Selain berfungsi sebagai ruang sangrai, tabung dilengkapi lubang poros berdiameter 20 mm pada bagian tengah dan perforasi 4 mm pada bagian belakang untuk membantu sirkulasi udara. Penutup tabung dirancang multifungsi sebagai jalur masuk biji, tempat *tester*, saluran pendingin, dudukan poros, dan keluaran biji sangrai menuju baki pendingin. Visualisasi tabung alat yang sudah didesain tersaji pada Gambar 2. Dari hasil ini dapat dipahami bahwa keputusan desain pada tahap awal sudah diarahkan untuk mendukung kebutuhan proses termal dan proses pemindahan material secara bersamaan.



Gambar 2. (a) Desain 3D tabung sangrai dan (b) desain alat sangrai kopi.

Putaran tabung juga menjadi bagian dari hasil perancangan. Berdasarkan perhitungan desain, putaran operasi yang dinilai sesuai berada pada rentang 68–82 rpm, dan pada penelitian ini dipilih 70 rpm sebagai kondisi simulasi. Pemilihan ini penting karena kecepatan putar yang terlalu rendah dapat menurunkan intensitas pembalikan biji, sedangkan putaran yang terlalu tinggi berisiko membuat biji ikut menempel pada dinding drum dan mengurangi efek jatuh-balik yang dibutuhkan dalam proses penyangraian. Hasil ini sejalan dengan studi tentang gerak material dalam drum roasting dan drum pemrosesan partikel yang menunjukkan bahwa kecepatan putar menjadi salah satu variabel dominan

dalam menentukan pola gerak material di dalam tabung (Chen *et al.*, 2024; Wang *et al.*, 2025a).

Secara umum, hasil pada tahap ini menunjukkan bahwa rancangan mesin telah memenuhi tujuan awal penelitian, yaitu menghasilkan model alat sangrai kopi kapasitas 1 kg yang siap dievaluasi lebih lanjut dengan simulasi termal dan simulasi partikel. Dengan demikian, hasil perancangan tidak hanya menjadi output geometrik, tetapi juga menjadi fondasi utama bagi analisis performa termal dan mekanik pada tahap selanjutnya.

3.2 Hasil simulasi termal pada variasi material dan ketebalan drum

Simulasi termal dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh material drum dan ketebalan dinding terhadap distribusi suhu di dalam tabung sangrai. Variasi yang dianalisis terdiri atas SS 304 tebal 4 mm, SS 304 tebal 6 mm, besi cor tebal 4 mm, dan besi cor tebal 6 mm. Semua skenario diuji dengan kondisi batas yang sama, yaitu temperatur sumber panas 550°C, kecepatan udara pemanas 1,4 m/s, suhu awal 28°C, dan kecepatan putar tabung 70 rpm. Skema kondisi batas dan contoh hasil kontur temperatur akhir ditampilkan pada Gambar 3.

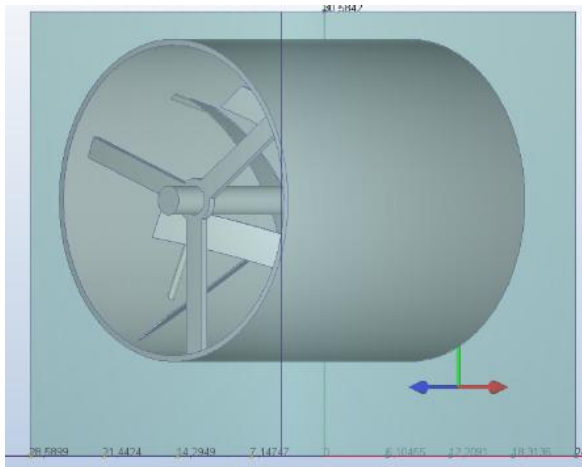
Hasil simulasi memperlihatkan bahwa perubahan material dan ketebalan drum menghasilkan perbedaan yang jelas terhadap suhu rata-rata udara di dalam tabung. Nilai suhu rata-rata yang diperoleh berturut-turut adalah 466°C untuk SS 304 tebal 4 mm, 266°C untuk SS 304 tebal 6 mm, 524°C untuk besi cor tebal 4 mm, dan 460°C untuk besi cor tebal 6 mm. Ringkasan hasil tersebut disajikan pada Tabel 5. Dari data ini dapat dilihat bahwa drum besi cor menghasilkan respons pemanasan yang lebih tinggi dibanding SS 304, sedangkan pada material yang sama, penambahan ketebalan cenderung menurunkan respons termal.

Tabel 5. Suhu rata-rata udara di dalam drum pada variasi material dan ketebalan

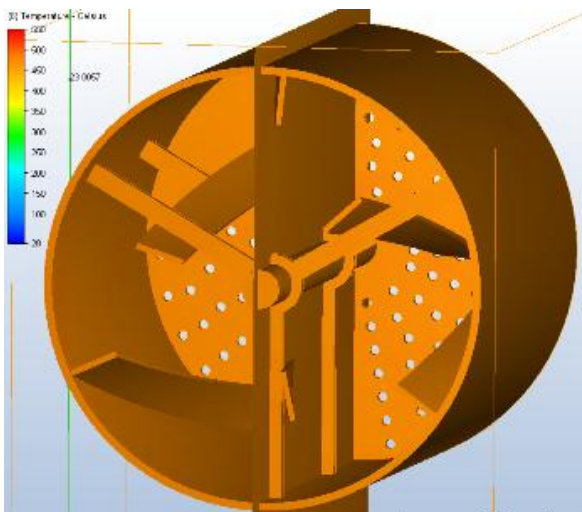
Variasi drum	Suhu rata-rata udara (°C)
SS 304, 4 mm	466
SS 304, 6 mm	266
Besi cor, 4 mm	524
Besi cor, 6 mm	460

Temuan ini menunjukkan bahwa material besi cor memiliki kemampuan penghantaran panas yang lebih tinggi dibanding SS 304. Secara teoritis, hal ini dapat dijelaskan oleh

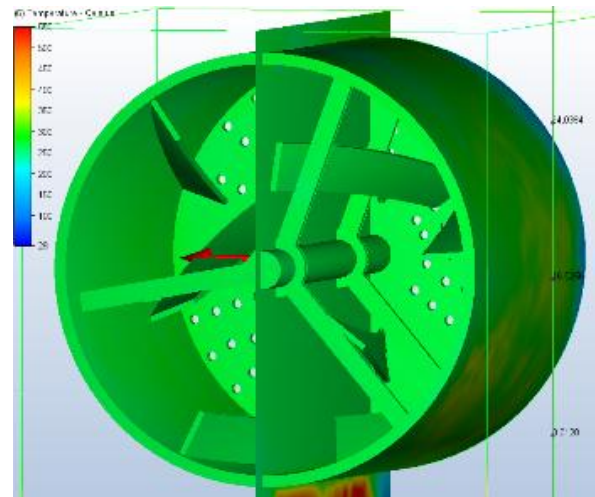
perbedaan konduktivitas termal kedua material, di mana besi cor memiliki nilai konduktivitas lebih besar sehingga energi panas lebih cepat ditransfer dari sumber pembakaran menuju dinding drum dan udara di dalamnya. Kecenderungan ini sejalan dengan berbagai studi pada sistem drum termal dan sistem granular panas yang menunjukkan bahwa sifat material sangat menentukan laju respons termal sistem (Hobbs *et al.*, 2025; Fan *et al.*, 2024; Jiang *et al.*, 2024). Dengan demikian, hasil penelitian ini menegaskan bahwa pemilihan material drum tidak bisa hanya didasarkan pada pertimbangan manufaktur atau ketahanan korosi, tetapi juga harus memperhatikan performa perpindahan panas selama operasi.



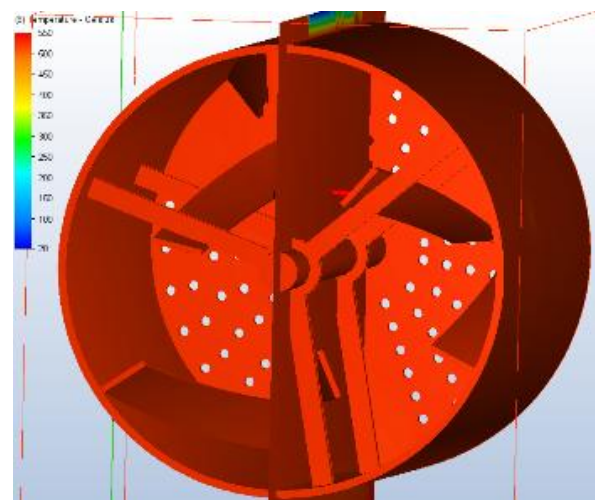
(a)



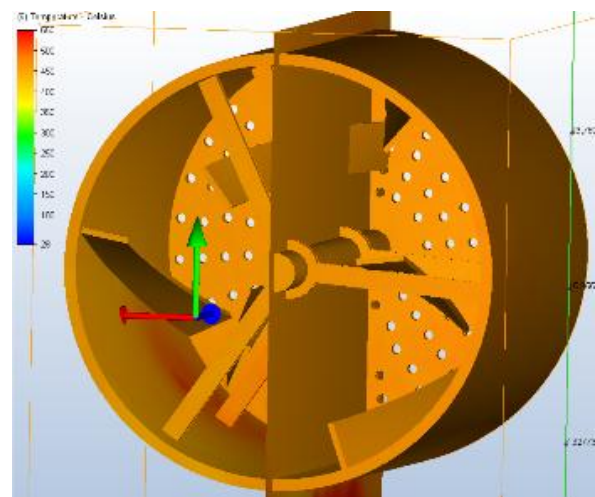
(b)



(c)



(d)



(e)

Gambar 3. Hasil simulasi termal pada variasi material drum: (a) kondisi batas simulasi, (b) kontur temperatur SS 304 4 mm pada 300 detik, (c) kontur temperatur SS 304 6 mm pada 300 detik, (d) kontur temperatur besi cor 4 mm pada 300 detik, (e) kontur temperatur besi cor 6 mm pada 300 detik.

Dari sisi ketebalan, hasil simulasi menunjukkan bahwa penambahan ketebalan pada SS 304 dari 4 mm menjadi 6 mm menurunkan suhu rata-rata secara tajam. Hal ini menandakan bahwa pada material dengan konduktivitas termal relatif rendah, ketebalan dinding menjadi hambatan tambahan bagi aliran panas. Sebaliknya, pada besi cor, penurunan suhu akibat penambahan ketebalan tidak sebesar pada SS 304. Temuan ini menunjukkan bahwa interaksi antara material dan ketebalan bersifat simultan. Hasil serupa juga dilaporkan pada kajian sistem termal berbasis granular dan drum, di mana perubahan geometri dinding dan struktur kontak panas berkontribusi langsung terhadap efektivitas pertukaran panas (Hobbs *et al.*, 2025; He, Dianyu and Jiang, 2025; Zhang *et al.*, 2025).

Selain suhu rata-rata, distribusi temperatur juga memberikan informasi penting. Pada drum SS 304 tebal 6 mm teramati adanya akumulasi panas pada area tertentu sebelum panas menyebar secara lebih luas. Fenomena ini ditunjukkan pada Gambar 4, yang memperlihatkan kemunculan *hot spot* pada dinding drum. Dalam konteks penyangraian kopi, kondisi tersebut tidak menguntungkan karena dapat menyebabkan sebagian biji mengalami paparan panas lokal yang lebih tinggi dibanding biji lain. Implikasi praktisnya adalah proses roasting berpotensi menjadi tidak seragam walaupun suhu rata-rata alat belum terlalu tinggi.



Gambar 4. Fenomena hot spot tabung sangrai

Hasil ini dapat dibandingkan dengan penelitian-penelitian mutakhir pada proses termal pangan. Arpaci, Atayilmaz and Gemici (2025) menjelaskan bahwa dalam sistem pengeringan dan proses termal, pemetaan distribusi suhu melalui CFD sangat penting untuk mendeteksi area yang tidak homogen. Al-Sharify *et al.* (2025) juga menunjukkan bahwa

pola aliran fluida dan distribusi temperatur di dalam alat proses memiliki konsekuensi langsung terhadap keseragaman proses. Walaupun konteks penelitiannya berbeda, prinsip yang ditunjukkan tetap relevan dengan hasil pada penelitian ini, yaitu bahwa distribusi panas yang tidak seragam berpotensi menurunkan mutu proses. Dalam bidang roasting dan pemanasan berbasis drum, kecenderungan serupa juga tampak pada studi Wang *et al.* (2025a) pada drum roasting teh hijau, yang menegaskan bahwa interaksi antara kecepatan putar, struktur internal, dan mekanisme kontak material dengan dinding memengaruhi perilaku proses secara signifikan.

Berdasarkan hasil simulasi, dua implikasi desain dapat ditarik. Pertama, SS 304 tebal 4 mm lebih baik dibanding SS 304 tebal 6 mm dari sisi respons pemanasan dan kestabilan distribusi panas. Kedua, walaupun besi cor tebal 4 mm menghasilkan suhu tertinggi, penggunaan besi cor tebal 6 mm lebih rasional untuk rekomendasi desain karena tetap memberikan suhu tinggi dengan keamanan struktural yang lebih baik. Dengan demikian, hasil simulasi termal menjawab rumusan masalah mengenai pengaruh material dan ketebalan dinding terhadap suhu di dalam tabung sangrai.

3.3 Hasil simulasi kerataan pergerakan biji pada variasi bilah pengaduk

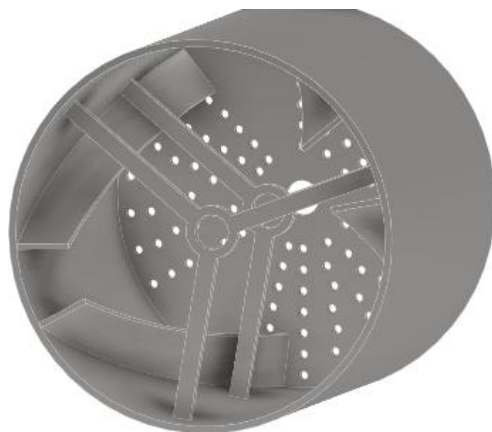
Analisis berikutnya dilakukan menggunakan DEM untuk mengevaluasi pengaruh variasi bilah pengaduk terhadap kerataan pergerakan biji. Simulasi dilakukan pada drum SS 304 tebal 4 mm dengan massa biji 0,75 kg dan kecepatan putar 70 rpm. Dua konfigurasi bilah diuji, yaitu pengaduk empat bilah pada dinding drum dan pengaduk enam bilah yang terdiri atas tiga bilah pada dinding dan tiga bilah tambahan pada bagian tengah. Bentuk partikel didekati menggunakan model *sphero-polygon* agar mendekati karakter biji kopi. Geometri pengaduk dan partikel simulasi ditunjukkan pada Gambar 5.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa konfigurasi bilah pengaduk memengaruhi distribusi frekuensi pembalikan biji. Pada pengaduk empat bilah, distribusi pembalikan terdiri atas 24,65% untuk 1–6 kali pembalikan, 50,00% untuk 7–12 kali pembalikan, dan 25,35% untuk 13–20 kali pembalikan. Sementara itu, pada pengaduk enam bilah,

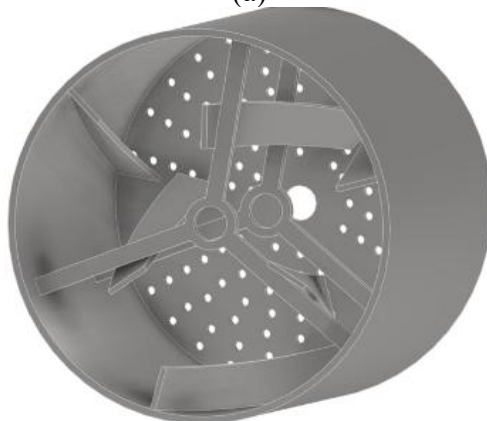
distribusi pembalikan berubah menjadi 22,70% untuk 1–6 kali pembalikan, 59,30% untuk 7–12 kali pembalikan, dan 18,00% untuk 13–20 kali pembalikan. Ringkasan hasil tersebut disajikan pada Tabel 6, sedangkan hasil visual DEM ditampilkan pada Gambar 6.

Tabel 6. Distribusi frekuensi pembalikan biji pada dua konfigurasi pengaduk

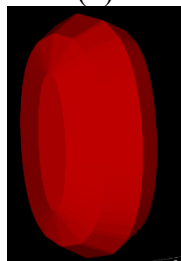
Konfigurasi pengaduk	1–6 kali (%)	7–12 kali (%)	13–20 kali (%)
4 bilah	24,65	50,00	25,35
6 bilah	22,70	59,30	18,00



(a)



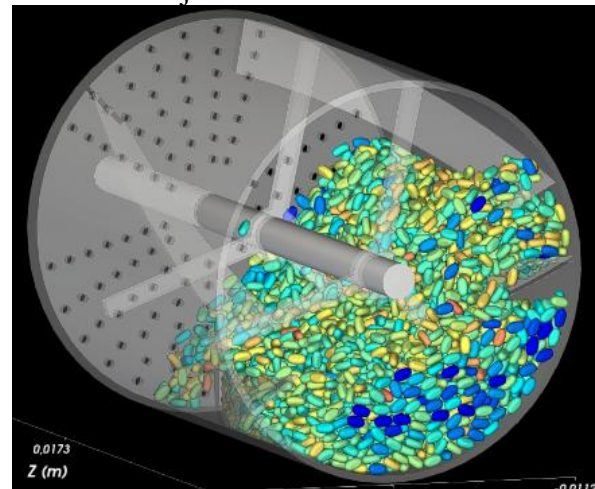
(b)



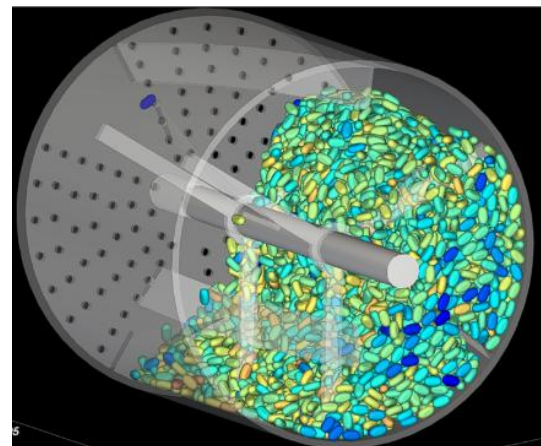
(c)

Gambar 5. Variasi pengaduk dan bentuk partikel pada simulasi DEM: (a) pengaduk empat bilah, (b) pengaduk enam bilah, (c) pendekatan bentuk biji kopi.

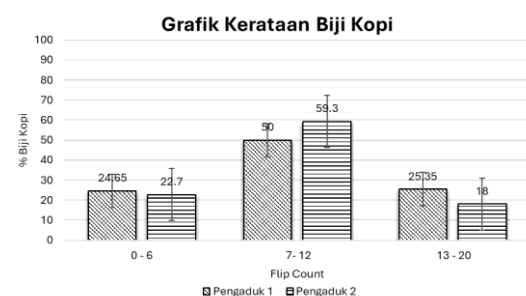
Dari Tabel 6 terlihat bahwa pengaduk enam bilah menghasilkan distribusi pembalikan yang lebih terkonsentrasi pada rentang menengah 7–12 kali. Kondisi ini menunjukkan bahwa sebagian besar biji mengalami siklus pembalikan yang lebih seragam. Sebaliknya, pengaduk empat bilah masih menunjukkan proporsi yang relatif tinggi pada kelompok 13–20 kali pembalikan, yang mengindikasikan bahwa sebagian biji terlalu sering terangkat dan jatuh kembali. Dalam proses roasting, ketidakseimbangan seperti ini dapat berkontribusi pada paparan panas yang tidak merata antar biji.



(a)



(b)



(c)

Gambar 6. Hasil simulasi DEM pada variasi pengaduk: (a) pola pergerakan biji pada pengaduk empat bilah, (b) pola pergerakan biji pada pengaduk enam bilah, (c) grafik distribusi frekuensi pembalikan biji.

Secara keseluruhan, pengaduk enam bilah menghasilkan kerataan pembalikan 118,59% lebih baik dibanding pengaduk empat bilah. Hal ini menunjukkan bahwa tiga bilah tambahan di bagian tengah tabung berperan penting dalam memperkuat sirkulasi aksial, sehingga aliran biji tidak hanya mengikuti rotasi lokal pada dinding, tetapi juga berpindah di sepanjang arah memanjang drum. Temuan ini penting karena pada roaster tipe drum, kualitas pencampuran sangat dipengaruhi oleh kemampuan elemen internal dalam memecah pola aliran yang stagnan.

Hasil penelitian ini sejalan dengan kajian Chen *et al.* (2024), yang menunjukkan bahwa perubahan rejim aliran partikel di dalam rotating drum sangat dipengaruhi oleh geometri partikel dan kondisi operasi. Pezo *et al.* (2025) juga menegaskan bahwa geometri internal mixer atau drum sangat menentukan kualitas pencampuran bahan granular. Dalam konteks pangan, Wang *et al.* (2025a) pada sistem roasting teh hijau menunjukkan bahwa sudut bilah dan kecepatan drum berpengaruh nyata terhadap lintasan partikel dan mekanisme transportasinya. Walaupun objek materialnya berbeda, prinsipnya tetap relevan, yaitu bahwa perubahan geometri internal dapat mengubah pola gerak material secara signifikan. Oleh karena itu, hasil pada penelitian ini memperkuat bahwa bilah pengaduk merupakan komponen desain yang menentukan pemerataan biji, bukan sekadar elemen mekanik pelengkap.

Dari sisi metodologis, hasil simulasi ini juga konsisten dengan perkembangan penggunaan DEM pada sistem granular. Pezo *et al.* (2025) menunjukkan bahwa DEM efektif untuk menjelaskan hubungan antara bentuk elemen pencampur dan perilaku partikel, sementara Wang *et al.* (2025b) menjelaskan bahwa simulasi aliran dan pencampuran pada sistem kompleks sangat membantu memahami fenomena yang sulit diamati langsung. Meskipun bidang aplikasinya berbeda, penelitian-penelitian tersebut menguatkan bahwa pendekatan DEM pada roaster kopi

merupakan pilihan yang tepat untuk mengevaluasi desain pengaduk secara lebih objektif.

3.4. Integrasi Hasil Simulasi, Ketidakpastian, dan Implikasi Desain Optimum

Hasil simulasi menunjukkan bahwa desain terbaik tidak ditentukan hanya oleh kemampuan mencapai suhu tertinggi, tetapi oleh keseimbangan antara respons termal drum dan homogenitas gerak biji. Secara termal, besi cor memberikan laju pemanasan lebih tinggi karena konduktivitas termalnya lebih besar, tetapi kecenderungan akumulasi panas lokal juga lebih tinggi sehingga potensi ketidakseragaman suhu di dalam drum meningkat. Sebaliknya, drum SS 304 tebal 4 mm memberikan distribusi panas yang lebih stabil, sedangkan konfigurasi enam bilah pengaduk menghasilkan pembalikan biji yang lebih merata dibanding empat bilah. Integrasi kedua hasil ini menunjukkan bahwa konfigurasi drum SS 304 4 mm dengan enam bilah pengaduk merupakan desain paling seimbang karena mampu menjaga kestabilan distribusi panas sekaligus meningkatkan pemerataan gerak biji. Dalam menafsirkan hasil ini, perlu dicatat bahwa masih terdapat ketidakpastian simulasi yang berasal dari penyederhanaan geometri partikel, asumsi sifat material dan aliran, pemilihan boundary condition, serta belum adanya validasi eksperimental langsung. Namun, karena seluruh variasi dibandingkan dengan domain, kondisi batas, dan parameter operasi yang sama, maka hasil simulasi tetap layak digunakan untuk membandingkan kecenderungan performa relatif antardesain, meskipun belum dapat dianggap sebagai nilai absolut sistem nyata (Fries, 2021; Szpicer et al., 2023; Szpicer et al., 2025a).

Dari sisi implikasi desain, hasil ini menunjukkan bahwa optimasi mesin sangrai kopi skala kecil sebaiknya diarahkan pada keseragaman proses roasting, bukan semata-mata peningkatan suhu. Desain drum SS 304 tebal 4 mm dengan enam bilah pengaduk berpotensi menghasilkan proses roasting yang lebih stabil, mengurangi peluang terbentuknya *hot spot*, dan memperbaiki konsistensi kontak termal antarbiji selama drum berputar. Secara praktis, konfigurasi ini penting karena dapat mendukung keseragaman tingkat sangrai, meningkatkan kendali proses, dan memperbesar

peluang diperolehnya mutu produk yang lebih konsisten pada kapasitas kecil. Temuan ini juga menegaskan bahwa pendekatan gabungan CFD–DEM tidak hanya berguna untuk mengevaluasi performa termal dan mekanik secara terpisah, tetapi juga efektif sebagai dasar pengambilan keputusan desain roaster yang lebih rasional. Meskipun demikian, untuk memperkuat reliabilitas hasil, penelitian lanjutan tetap diperlukan melalui uji eksperimental, analisis sensitivitas parameter, dan kuantifikasi error numerik agar rekomendasi desain yang dihasilkan dapat diterapkan lebih yakin pada kondisi operasi nyata (Al-Shemmeri et al., 2023; He et al., 2025; Rivera and Jaeger, 2025).

4. PENUTUP

4.1. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa optimasi desain mesin sangrai kopi kapasitas 1 kg tidak dapat ditentukan hanya berdasarkan kemampuan mencapai suhu tertinggi, tetapi harus dipahami sebagai hasil integrasi antara karakteristik termal drum dan efektivitas mekanisme pengadukan biji. Kontribusi ilmiah utama penelitian ini adalah menunjukkan bahwa pendekatan gabungan simulasi CFD dan DEM dapat digunakan untuk mengevaluasi secara simultan pengaruh material drum, ketebalan dinding, dan konfigurasi bilah pengaduk terhadap performa mesin sangrai kopi skala kecil.

Hasil simulasi termal menunjukkan bahwa material dan ketebalan dinding drum berpengaruh nyata terhadap distribusi suhu di dalam tabung sangrai. Besi cor memiliki respons pemanasan lebih tinggi dibandingkan SS 304, namun desain terbaik tidak ditentukan oleh suhu tertinggi semata. Dari sisi kestabilan distribusi panas dan pertimbangan material food-grade, drum SS 304 tebal 4 mm memberikan performa yang lebih seimbang. Pada sisi lain, hasil simulasi DEM menunjukkan bahwa konfigurasi enam bilah pengaduk menghasilkan pola pembalikan biji yang lebih seragam dibandingkan empat bilah, sehingga lebih mendukung pemerataan gerak biji selama proses roasting. Dengan demikian, kombinasi drum SS 304 tebal 4 mm dan enam bilah pengaduk dapat dipandang sebagai konfigurasi desain yang paling optimal dalam penelitian ini

karena mampu memberikan keseimbangan antara kestabilan termal dan homogenitas pergerakan biji.

Penelitian ini juga memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, seluruh analisis masih berbasis simulasi sehingga hasil yang diperoleh belum divalidasi secara langsung melalui pengujian eksperimen pada prototipe fisik. Kedua, model yang digunakan masih bergantung pada sejumlah asumsi penyederhanaan, baik pada representasi aliran panas maupun perilaku partikel biji kopi, sehingga belum sepenuhnya menggambarkan kondisi aktual selama proses roasting. Oleh karena itu, hasil penelitian ini lebih tepat dipandang sebagai dasar ilmiah untuk pengembangan desain awal dan pengambilan keputusan desain, bukan sebagai representasi final dari performa alat dalam kondisi nyata.

4.2. Saran

Penelitian selanjutnya perlu diarahkan pada validasi eksperimental untuk menguji kesesuaian hasil simulasi dengan kondisi riil di lapangan. Validasi tersebut dapat dilakukan melalui pengukuran suhu aktual di dalam drum, pengamatan keseragaman tingkat sangrai, evaluasi warna biji, serta pengujian mutu sensori hasil roasting. Langkah ini penting agar hasil simulasi CFD dan DEM yang diperoleh dalam penelitian ini dapat dikonfirmasi secara lebih meyakinkan.

Selain itu, pengembangan penelitian ke depan dapat dilakukan melalui optimasi multi-parameter yang lebih luas, misalnya dengan menambahkan variasi kecepatan putar drum, suhu operasi, waktu roasting, kapasitas muatan biji, dan bentuk bilah pengaduk. Penyempurnaan model juga perlu dilakukan dengan menggunakan input simulasi yang lebih representatif, waktu iterasi yang lebih panjang, serta resolusi komputasi yang lebih tinggi agar distribusi suhu dan perilaku partikel dapat ditangkap dengan lebih akurat. Dari sisi desain alat, pengembangan lebih lanjut juga disarankan pada sistem penggerak, sistem pendingin, dan detail konstruksi agar rancangan mesin sangrai yang dihasilkan tidak hanya optimal secara simulatif, tetapi juga layak diterapkan pada proses manufaktur dan pengoperasian nyata.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Al-Ghamdi, S., Alfaifi, B., Elamin, W. and Lateef, M.A. (2024) 'Advancements in coffee manufacturing: From dehydration techniques to quality control', *Food Engineering Reviews*.
- Al-Shemmeri, M., Windows-Yule, K., Lopez-Quiroga, E. and Fryer, P.J. (2023) 'Coffee bean particle motion in a rotating drum measured using Positron Emission Particle Tracking (PEPT)', *Food Research International*.
- Al-Shemmeri, M., Fryer, P.J., Farr, R. and Lopez-Quiroga, E. (2025) 'Batch-scale simulation of heat and mass transfer of coffee roasting in spouted bed roasters', *Beverages*, 11(6), 162.
- Al-Sharif, Z.T., Al-Najjar, S.Z., Naser, Z.A., Alsherfy, Z.A.I. and Onyeaka, H. (2025) 'The impact of fluid flow on microbial growth and distribution in food processing systems', *Foods*, 14(3), 401.
- Arpaci, E., Atayilmaz, Ş.Ö. and Gemici, Z. (2025) 'Exploring mathematical modeling and CFD in convective drying of fruits and vegetables: A review', *Food and Bioprocess Technology*.
- Berkinova, Z., Sauirbayeva, A., Adil, T., Kalmakhanbet, A., Golman, B., Ibrayev, M. and Spitas, C. (2025) 'Estimation of the effect of rotational speed on flow and mixing quality of particles with different shapes in a rotary drum', *Computational Particle Mechanics*.
- Bottazzi, D., Farina, S., Milani, M. and Montorsi, L. (2012) 'A numerical approach for the analysis of the coffee roasting process', *Journal of Food Engineering*.
- Chen, G., Mei, Y., Zhang, Y. and Jin, B. (2024) 'DEM investigation on flow regime transition of cylindrical particle in a rotating drum', *International Journal of Chemical Reactor Engineering*.
- de Carvalho, A.J.B., Silveira, P.G., Mequelino, D.B., Corrêa, J.L.G., Nascimento, S.M. and Petri-Júnior, I. (2025) 'Experimental and numerical study via CFD of a rotating drum dimensioning applied in the microwave-assisted convective drying of specialty coffees', *Journal of Food Process Engineering*.
- Debona, D.G., Louvem, R.F., Luz, J.M.R., Nariyoshi, Y.N. and Oliveira, A.L.M. (2022) 'Heat and mass transfer kinetics on the chemical and sensory quality of arabica coffee beans', *Agronomy*, 12(11), 2880.
- Fabbri, A., Cevoli, C., Alessandrini, L. and Romani, S. (2011) 'Numerical modeling of heat and mass transfer during coffee roasting process', *Journal of Food Engineering*.
- Fan, G., Su, F., Zhao, Q., Li, C. and Li, B. (2024) 'Study on heat transfer process between high-temperature slag particles and scrap in drum based on DEM method', *Processes*, 12(4), 815.
- Fries, L. (2021) 'Modeling food particle systems: A review of current progress and challenges', *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*.
- He, Y., Dianyu, E., Lai, N.C. and Jiang, Z. (2025) 'Influence of flight structures and baffle dam on particle behaviors and gas-solid heat exchange enhancement in a rotary drum', *Particuology*.
- Hobbs, A., Gatiganti, S.C., Leiva-Villacorta, F., Heitzman, M. and Ooi, J.Y. (2025) 'Experimental and numerical study of conductive heat transfer in aggregate particles using a flighted, rotary drum', *Road Materials and Pavement Design*.
- Jiang, B., Pei, H., Xia, D. and Wang, H. (2024) 'Numerical insight into heat transfer enhancement by granules inner-migration in a moving bed: A performance comparison between slanted-stick and plow-shaped agitators', *Particuology*.
- Li, Z., Zhou, T., Lu, W., Yang, H., Li, Y., Liu, Y. and Zhang, M. (2025) 'Computational fluid dynamics (CFD) technology methodology and analysis of waste heat recovery from high-temperature solid granule: A review', *Sustainability*, 17(2), 480.
- Majeed, F., Raza, A., Munir, A. and Hensel, O. (2022) 'Development and experiments on a batch-type solar roaster—an innovative decentralized system for coffee roasting', *Sustainability*, 14(4), 2217.
- Panigrahi, S.S., Mishra, G., Kumar, V., Panigrahi, C., Kaur, G., Shaikh, A.E.Y., Kumar, S. and Panda, B.K. (2025) 'Next-generation food drying: Specialized and smart approaches to boost efficiency and

- quality', *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*.
- Pezo, M., Pezo, L., Lončar, B., Kojić, P. and Jovanović, A.A. (2025) 'A comprehensive review of discrete element method studies of granular flow in static mixers', *Processes*, 13(11), 3522.
- Puntuwanit, K., Maneechot, P., Suriwong, T. and Nimpanich, K. (2025) Evaluation of far infrared technology in coffee roasting for improved heat dynamics, energy efficiency and sensory assessment', *Journal of Food Measurement and Characterization*.
- Rahayuningtyas, A., Sagita, D., Karim, M.A., Yulianti, L.E., Putri, D.P., Azizah, I.F. and Siregar, Y.H. (2024) 'Unraveling the performance of fluidized coffee roasters under slow and fast roasting processes: Energy, quality, and economic analysis', *Journal of Biosystems Engineering*.
- Resende, I.A., Machado, M.V.C., Duarte, C.R. and Barrozo, M.A.S. (2017) 'An experimental analysis of coffee beans dynamics in a rotary drum', *The Canadian Journal of Chemical Engineering*.
- Rivera, J. and Jaeger, H. (2025) Maximizing benefits from numerical simulation for food process optimization and further advancement by integration of AI', *Food Engineering Reviews*.
- Sachak-Patwa, R., Fadai, N. and Van Gorder, R.A. (2019) A homogenization approach for the roasting of an array of coffee beans', *SIAM Journal on Applied Mathematics*.
- Sarailoo, H., Campbell, L. and Bougherara, H. (2025) 'A comprehensive review on the application of computational fluid dynamics in enhancing indoor vertical farm microclimate', *Journal of Biosystems Engineering*.
- Szpicer, A., Bińkowska, W., Wojtasik-Kalinowska, I. et al. (2023) Application of computational fluid dynamics simulations in food industry', *European Food Research and Technology*.
- Szpicer, A., Bińkowska, W., Stelmasiak, A. and Zalewska, M. et al. (2025a) 'Computational fluid dynamics simulation of thermal processes in food technology and their applications in the food industry', *Applied Sciences*, 15(1), 424.
- Szpicer, A., Bińkowska, W., Stelmasiak, A. et al. (2025b) 'Advances in computational fluid dynamics of mechanical processes in food engineering: Mixing, extrusion, drying, and process optimization', *Applied Sciences*, 15(15), 8752.
- Wang, H., Choudhury, D., Suntornnond, R. and Zhou, W. (2026) 'Scaling up cultivated meat bioprocessing: A mechanistic review of computational fluid dynamics as a rational design tool', *Bioresource Technology*.
- Wang, T., Zou, S., Wu, P., Deng, R., Fu, C., Li, C. and Chen, A.Z. (2025) 'CFD modeling of flow, mixing, digestion, and absorption in the small intestine', *Food Engineering Reviews*.
- Wang, X., Ntezimana, B., Liang, G., Ding, T., Yao, N., Wang, Y., Yu, Z., Zhang, D., Chen, Y. and Ni, D. (2025) 'Shape formation mechanism of roasted green tea during roasting process', *Journal of Food Engineering*.
- Yang, X., Xi, T., Qin, Y., Zhang, H. and Wang, Y. (2024) 'Computational fluid dynamics–discrete phase method simulations in process engineering: A review of recent progress', *Applied Sciences*, 14(9), 3856.
- Zhang, Y., Liu, X., Zhang, P., Zhang, Y. and Gao, H. (2025) 'Enhanced motion behavior and heat transfer performance of boiler slag in a rotary drum with heat exchange half-pipes', *Thermal Science and Engineering Progress*.