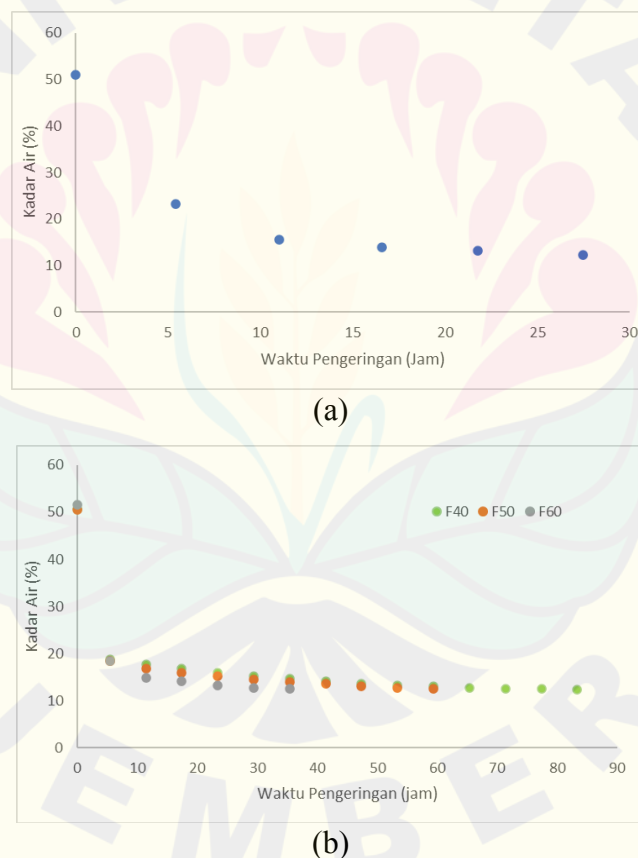


BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Kadar Air

Pengamatan terhadap perubahan kadar air bertujuan untuk mengetahui efisiensi penggunaan Fermentor dalam menurunkan jumlah air di dalam biji kopi robusta. Proses pengeringan pada penelitian ini melibatkan dua perlakuan, yaitu perlakuan *sun drying* (SD) sebagai kontrol dan perlakuan kombinasi antara *sun drying* (SD) dengan Fermentor dengan variasi suhu, meliputi F40 (40°C), F50 (50°C), dan F60 (60°C). Hasil perbandingan kadar air dapat dilihat pada **Gambar 4.1**.



(a) Grafik kadar air *sun drying*; (b) Grafik kadar air Fermentor

Gambar 4.1 Grafik perbandingan penurunan kadar air

Berdasarkan Gambar 4.1 a, data perlakuan *sun drying* menunjukkan bahwa kadar air awal biji kopi pasca-perendaman (jam ke-0) tercatat sebesar 50,93%.

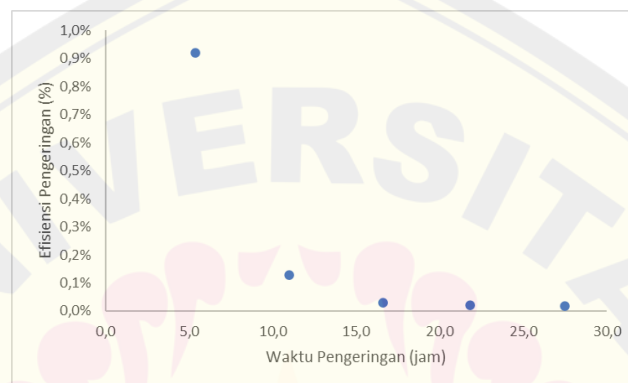
Selama proses penjemuran di bawah sinar matahari, penurunan kadar air berlangsung secara bertahap hingga mencapai 23,25% pada jam ke-5,4, kemudian turun kembali menjadi 15,60% pada jam ke-11,0, dan 13,99% pada jam ke-16,6. Laju penurunan kadar air melambat pada jam ke-21,8 dengan nilai 13,16%, hingga akhirnya proses pengeringan dihentikan pada jam ke-27,5 total penyinaran saat kadar air bahan telah menyentuh angka 12,37%.

Perlakuan kombinasi yang tersaji pada Gambar 4.1b menyajikan bahwa di antara seluruh perlakuan kombinasi, perlakuan F60 merupakan perlakuan terbaik karena mampu menyentuh target kadar air sebesar 12,43% dengan total durasi pengeringan paling singkat, yaitu 35,4 jam (5,4 jam *Sun drying* + 30 jam fermentor). Perlakuan F50 menjadi perlakuan terbaik kedua yang mencapai kadar air akhir 12,43% pada total waktu 59,4 jam, sedangkan perlakuan F40 membutuhkan durasi paling lambat dengan tren garis yang paling landai untuk mencapai titik akhir 12,40% pada total waktu 83,4 jam. Durasi penurunan kadar air biji kopi dipengaruhi oleh metode pengeringan, kondisi cuaca selama pengujian, suhu, dan laju aliran udara yang digunakan (Santoso *et al.*, 2023). Hal ini yang menyebabkan perlakuan kombinasi membutuhkan waktu yang lebih lama dibandingkan dengan *sun drying* dikarenakan tidak adanya sistem aliran udara yang membuat uap air yang harusnya dikeluarkan menjadi menumpuk dan menjadi embun pada lapisan bawah penutup Fermentor. Suhu sangat berpengaruh terhadap terjadinya penurunan kadar air, dimana suhu yang tinggi memberikan perubahan kadar air yang cepat (Susana *et al.*, 2023). Semua perlakuan mampu menyentuh angka dibawah 12,5% dan telah memenuhi mutu kadar air akhir. Kadar air menurut SNI 2907:2008 batas maksimalnya adalah 12,5% (BSN, 2008). Jika kadar air melebihi batas standar, mutu biji kopi dikategorikan buruk, sedangkan kadar air yang berada di bawah atau sesuai standar menunjukkan mutu penyimpanan yang baik (Kembaren & Muchsin, 2021).

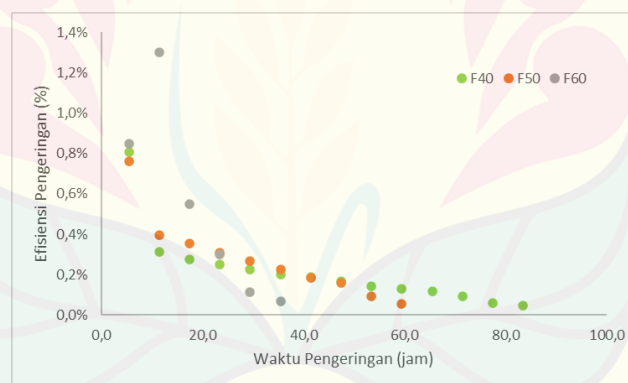
4.2 Efisiensi Pengeringan

Efisiensi pengeringan dihitung berdasarkan rasio perbandingan antara energi panas yang benar-benar digunakan untuk menguapkan air dari dalam bahan

dengan total energi panas yang dikeluarkan oleh sumber pemanas alat pengering. Suhelmi *et al.*, (2022) menyatakan bahwa efisiensi pengeringan merupakan bentuk perbandingan antara energi bersih untuk memanaskan suatu komoditas terhadap energi total yang dihasilkan oleh sistem pemanas. Semakin tinggi nilai persentase efisiensi, maka konsumsi energi yang diperlukan untuk mengeringkan setiap satuan massa bahan akan menjadi semakin sedikit (Zamharir *et al.*, 2016). Hasil perhitungan nilai efisiensi pengeringan disajikan pada **Gambar 4.2**.



(a)



(b)

(a) Efisiensi pengeringan *sun drying*; (b) Efisiensi pengeringan Fermentor

Gambar 4.2 Grafik perbandingan efisiensi pengeringan

Berdasarkan Gambar 4.2a, efisiensi pengeringan pada perlakuan *sun drying* memperlihatkan pola penurunan dari nilai tertinggi sebesar 0,9199% pada jam ke-5,4, lalu merosot tajam menjadi 0,1291% pada jam ke-11,0, dan terus melandai hingga tersisa 0,0164% di akhir penjemuran (jam ke-27,5). Pada perlakuan kombinasi (Gambar 4.2b), saat bahan masih menjalani pra-pengeringan matahari (jam ke-5,4), efisiensinya tercatat sebesar 0,8065% (F40), 0,7607% (F50), dan

0,8501% (F60). Setelah bahan dipindahkan ke dalam unit fermentor (mulai jam ke-11,4), perlakuan F60 mencatatkan titik efisiensi tertinggi sebesar 1,3038%, sedangkan F50 dan F40 masing-masing berada di angka 0,3965% dan 0,3124%. Nilai puncak pada F60 terjadi karena penggunaan suhu operasi 60 °C menghasilkan laju penguapan air bebas yang paling masif dibanding perlakuan lainnya.

Setelah melewati titik puncak tersebut, garis grafik seluruh perlakuan kombinasi tidak membentuk garis lurus yang stabil, melainkan menunjukkan kurva penurunan secara melandai hingga akhir proses pengeringan. Penurunan efisiensi ini terjadi akibat beralihnya proses ke fase laju pengeringan menurun (*falling rate period*), dimana kadar air bebas di permukaan biji kopi telah habis dan digantikan oleh penguapan air terikat di dalam jaringan sel yang berlangsung lebih lambat. Menyusutnya massa air yang teruapkan (m_w) per satuan waktu menyebabkan energi laten ($Q_{konveksi}$) mengecil. Selain itu, secara matematis, energi input $Q_{in} = P \times t$ bertindak sebagai penyebut dikarenakan waktu pengeringan (t) terus bertambah secara akumulatif sementara daya elemen pemanas (P) konstan, nilai penyebut membengkak dan membuat persentase efisiensi (η) melandai turun. Perlakuan F60 mencatatkan waktu pengeringan paling singkat hingga jam ke-35,4 (efisiensi akhir 0,0698%), diikuti F50 hingga jam ke-59,4 (0,0559%), dan F40 yang berlangsung paling lama hingga jam ke-83,4 (0,0466%). Mekanisme termodinamika ini didasarkan pada perhitungan **Persamaan (4.1)**:

$$\eta = \frac{Q_{useful}}{Q_{in}} \times 100\% \quad (4.1)$$

Tingginya efisiensi pada awal proses di dalam fermentor menunjukkan bahwa input energi panas (Q_{in}) mampu didistribusikan secara optimal menjadi energi panas efektif (Q_{useful}). Sesuai dengan **Persamaan (4.2)**, energi panas *useful* yang diserap oleh biji kopi merupakan akumulasi dari mekanisme konduksi dan konveksi:

$$Q_{useful} = Q_{konduksi} + Q_{konveksi} \quad (4.2)$$

Stabilitas suhu menciptakan perbedaan panas antara permukaan bahan dengan udara pengering di dalam ruang fermentor. Kondisi ini memicu peningkatan nilai $Q_{konveksi}$, dimana udara panas terus-menerus menabrak permukaan biji kopi. Selain itu, panas yang merambat melalui dinding bejana $Q_{konduksi}$ mempercepat

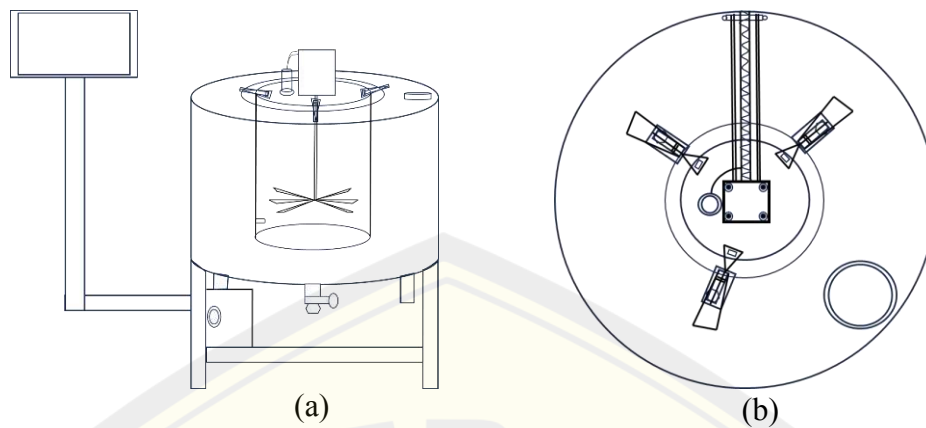
pemanasan biji kopi, sehingga energi yang terserap untuk menguapkan air menjadi besar.

Rendahnya nilai efisiensi pada metode SD dipengaruhi oleh variabel energi yang berbeda sebagaimana dinyatakan dalam rumus efisiensi pengeringan matahari yang tertera pada **Persamaan (4.3)**.

$$\eta = \frac{(m_1 - m_2)hi}{A_s \times I_{(t)} \times t_s} \quad (4.3)$$

Berdasarkan rumus tersebut, energi input utama berasal dari radiasi matahari $I_{(t)}$ yang mengenai luasan area penjemuran (A_s) selama waktu pengeringan (t_s). Meskipun energi matahari yang menyinari permukaan ($A_s I_{(t)} t_s$) sangat besar secara kuantitas, namun perubahan massa air yang diuapkan ($m_1 - m_2$) berlangsung sangat lambat. Sistem pengeringan terbuka tidak memiliki mekanisme penahan radiasi balik atau pengatur sirkulasi udara, sehingga sebagian besar energi matahari terbuang percuma ke lingkungan. Faktor tersebut menyebabkan nilai pembilang pada **Persamaan (4.3)** menjadi sangat kecil jika dibandingkan dengan nilai penyebut total radiasi input. Kondisi matematis ini menjelaskan alasan efisiensi pengeringan matahari bernilai sangat rendah.

Nilai efisiensi pengeringan yang dicapai oleh perangkat fermentor berkaitan dengan desain fisik dan mekanisme kerja alat yang digunakan. Konstruksi fisik dan mekanisme kerja internal dari perangkat utama yang digunakan memegang peranan penting terhadap pencapaian angka efisiensi pengeringan pada fermentor. Alat ini menerapkan desain ruang silinder tertutup yang dilengkapi dengan sistem pemanas tipe mantel air (*water jacket*). Komponen *water jacket* tersebut bekerja dengan cara mengalirkan media air panas secara merata mengelilingi dinding luar tabung fermentasi, sehingga mampu menyebarkan panas secara konduksi ke seluruh ruang dalam dan menjaga stabilitas suhu. Desain fisik perangkat Fermentor yang digunakan pada penelitian ini disajikan secara detail pada **Gambar 4.3**.



(a) gambar Fermentor tampak depan; (b) gambar Fermentor tampak atas

Gambar 4.3 Desain Fermentor

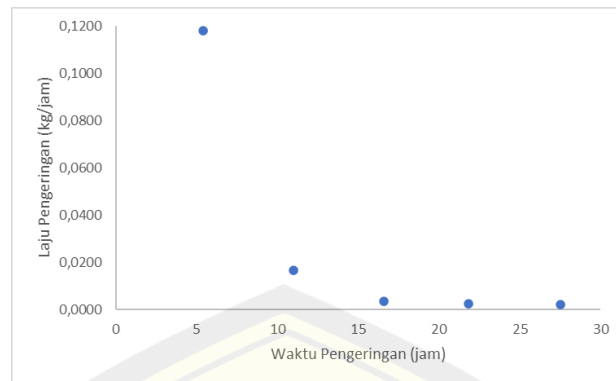
Alat ini tidak memiliki sistem pembuangan udara otomatis, namun aktivitas membuka tutup fermentor serta membersihkan air atau embun yang terjebak pada bagian dalam tutup secara manual setiap 6 jam sekali terbukti membantu proses pengeluaran uap air. Mekanisme manual ini berhasil membuang massa air yang menguap dan mencegah terjadinya pembasahan kembali pada biji kopi tanpa menyebabkan penurunan suhu ruang. Energi panas total yang masuk ke dalam sistem dapat difokuskan untuk menguapkan kandungan air internal biji kopi, sehingga menghasilkan nilai efisiensi yang optimum sepanjang proses pengurangan air bahan berlangsung.

Nilai efisiensi pengeringan menggunakan fermentor menunjukkan performa yang lebih unggul dibandingkan dengan metode penjemuran tradisional *sun drying*, alat pengering tipe tumpukan *fixed bed dryer*, pengering tipe Efek Rumah Kaca (ERK), *fluidized bed dryer* maupun pengering tipe drum *rotary drum dryer*. Pengeringan *Sun drying* menghasilkan efisiensi yang sangat rendah karena struktur areanya yang terbuka membuat energi radiasi surya mudah tersapu oleh embusan angin bebas. Keterbatasan utama dari sistem penjemuran alami terletak pada kerentanan fluktuasi cuaca yang menyulitkan penyeragaman suhu, meskipun metode ini unggul dari segi penghematan biaya energi (Nurdin *et al.*, 2022). Sementara itu, pada alat pengering mekanis konvensional seperti *fixed bed dryer*, penggunaan kipas *blower* secara terus-menerus untuk mengalirkan udara panas

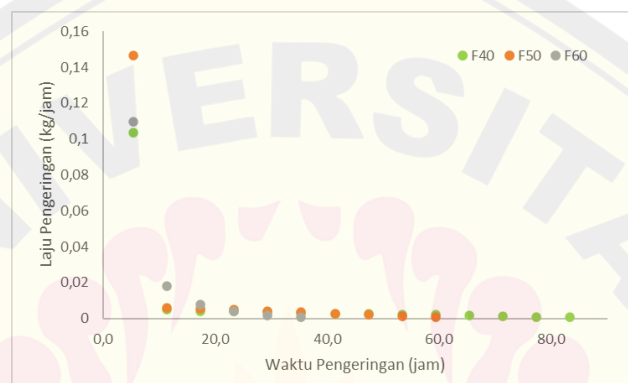
sering kali menyebabkan kehilangan panas *heat loss* yang cukup besar melalui saluran pembuangan udara jika dinding alat tidak dilapisi isolator yang tebal. Pada pengering Efek Rumah Kaca (ERK), meskipun sama-sama memanfaatkan ruangan tertutup untuk memerangkap panas, pengering ERK masih sangat bergantung pada fluktuasi cuaca dan intensitas matahari harian, sehingga suhu di dalamnya tidak sestabil sistem *water jacket* pada fermentor. Selanjutnya, jika dibandingkan dengan pengering tipe drum *rotary drum dryer*, meskipun alat tersebut memiliki keunggulan dalam membalik biji kopi secara konstan agar panasnya merata, kehilangan panas *heat loss* pada dinding silinder drum yang berputar biasanya cukup tinggi serta membutuhkan konsumsi energi mekanis yang lebih besar. Sedangkan kelebihan utama dari metode *fluidized bed dryer* adalah laju pengeringannya yang tinggi dan merata berkat peningkatan koefisien pindah massa dan panas melalui interaksi partikel yang intens. Namun di sisi lain, pengering tipe ini membutuhkan suplai energi yang lebih besar serta sistem operasional yang lebih kompleks (Ibrahim *et al.*, 2023).

4.3 Laju Pengeringan

Pengamatan terhadap perubahan laju pengeringan bertujuan untuk mengetahui kecepatan penguapan air dari dalam biji kopi robusta pada setiap satuan waktu. Laju pengeringan merupakan parameter penting yang menunjukkan jumlah massa air yang berhasil diuapkan dari dalam suatu bahan selama proses pengeringan berlangsung (Tanggasari & Jatnika, 2023). Laju pengeringan mengacu pada tingkat penurunan atau hilangnya kandungan air dari suatu bahan dalam satuan waktu tertentu (Orilda *et al.*, 2022). Hasil perhitungan nilai laju pengeringan disajikan pada **Gambar 4.4**.



(a)



(b)

(a) *Sun drying*; (b) Fermentor

Gambar 4.4 Grafik perbandingan laju pengeringan

Berdasarkan Gambar 4.4, perlakuan *sun drying* maupun perlakuan kombinasi (F40, F50, dan F60) secara umum punya pola yang sama. Grafiknya mengalami penurunan yang cukup tajam di awal, lalu mulai melandai mendekati angka nol sampai proses pengeringan selesai. Pada perlakuan *sun drying*, laju pengeringan tertinggi ada di jam ke-5,4 yaitu sebesar 0,1180 kg/jam, lalu turun drastis jadi 0,0166 kg/jam di jam ke-11,0, dan terus melandai sampai 0,0021 kg/jam di jam ke-27,5. Pada perlakuan kombinasi, laju pengeringan paling tinggi secara keseluruhan justru didapat saat fase pra-pengeringan menggunakan sinar matahari (jam ke-5,4). Pada titik ini, perlakuan F50 mencatatkan laju penguapan tertinggi sebesar 0,1464 kg/jam, disusul F60 (0,1098 kg/jam), dan F40 (0,1034 kg/jam). Tingginya laju pengeringan di 5,4 jam pertama ini terjadi karena kandungan air bebas di permukaan biji kopi pasca-perendaman masih sangat banyak, sehingga panas dari matahari bisa menguapkan air dengan sangat cepat.

Saat masuk ke dalam Fermentor, performa dari masing-masing perlakuan kombinasi mulai terlihat berbeda. Perlakuan F60 jadi perlakuan kombinasi yang paling bagus di dalam mesin, karena bisa mempertahankan laju pengeringan paling tinggi dibanding yang lain, yaitu sebesar 0,0179 kg/jam pada jam ke-11,4 dibandingkan F40 yang cuma 0,0048 kg/jam dan F50 sebesar 0,0061 kg/jam. Hal ini terjadi karena suhu 60 °C memberikan energi panas yang lebih besar ke dalam biji kopi, jadi dorongan air buat keluar dari dalam biji menuju permukaan jadi lebih cepat. Stabilitas suhu yang dihasilkan oleh Fermentor memastikan bahwa pindah panas terjadi secara konstan, sehingga laju penurunan kadar air lebih terukur.

Tingginya intensitas pindah panas pada awal proses merupakan respons dari besarnya perbedaan suhu antara lingkungan pengering dengan bahan yang memicu percepatan pindah massa air. Energi panas total (Q_{total}) di dalam sistem fermentor bersumber dari kombinasi konduksi dinding bejana ($Q_{conduction}$) dan konveksi udara tertutup ($Q_{convection}$) yang mampu memutuskan ikatan hidrogen molekul air di dalam biji. Fenomena pindah massa air (m_w) per satuan waktu (t) ini dihitung berdasarkan rumus laju pengeringan pada Persamaan (4.4).

$$m_p = \frac{m_w}{t} \quad (4.3)$$

Hubungan proses terletak pada variabel m_w atau rasio massa air yang dikeluarkan dari dalam bahan. Pindah panas bertindak sebagai sumber energi penggerak yang menentukan seberapa besar massa air (m_w) yang mampu berpindah dari dalam jaringan biji kopi menuju permukaan untuk diuapkan dalam satuan waktu (t). Pada perlakuan matahari (SD) interval awal, nilai laju pengeringan yang mencapai 0,1180 kg/jam menunjukkan bahwa energi radiasi matahari mampu menguapkan massa air bebas di permukaan. Namun, Perlakuan mekanis seperti F60 mampu menjaga kestabilan nilai tetap tinggi secara konsisten seiring berjalannya waktu pengujian. Hal ini terjadi karena energi termal (Q) pada sistem tertutup terus menembus tumpukan biji kopi secara kontinu, sehingga kecepatan penguapan tidak merosot tajam seperti yang terjadi pada metode SD ketika kandungan air bebas mulai habis.

Karakteristik laju pengeringan yang dihasilkan selama proses berlangsung sangat dipengaruhi oleh mekanisme kerja dari Fermentor yang digunakan. Sistem pemanas *water jacket* pada alat ini mampu menyuplai panas secara konstan, sehingga menjaga suhu ruang pengering tetap stabil. Suhu yang stabil ini sangat penting untuk mempertahankan perbedaan tekanan uap yang tinggi antara bagian dalam biji kopi dengan udara lingkungan di dalam bejana. Selain itu, tindakan manual membuka tutup fermentor dan menyeka embun setiap 6 jam sekali berperan besar dalam menjaga laju pengeringan agar tidak menurun drastis. Aktivitas pembuangan uap air yang terperangkap di bawah permukaan tutup tersebut berhasil menurunkan kelembapan relatif (RH) udara ruang secara berkala. Berkurangnya konsentrasi uap air di udara menyebabkan dorongan air dari dalam jaringan biji kopi untuk keluar menuju permukaan tetap berjalan optimal, sehingga penurunan laju pengeringan dapat berlangsung secara konstan dan terukur.

Pola penurunan laju pengeringan menggunakan alat fermentor terkontrol ini memiliki karakteristik yang lebih stabil jika dibandingkan dengan beberapa tipe alat pengering lainnya. Metode penjemuran alami SD memperlihatkan laju yang sangat tinggi di awal proses, tetapi lajunya merosot tajam pada hari kedua (0,0166 kg/jam) hingga jam ke 27,5 (0,0021 kg/jam) karena sangat bergantung pada fluktuasi cuaca harian. Keterbatasan utama dari sistem penjemuran terbuka terletak pada kerentanan terhadap cuaca yang menyulitkan penyeragaman suhu, meskipun metode ini ramah lingkungan dan hemat energi (Nurdin *et al.*, 2022). Alat pengering tipe Efek Rumah Kaca (ERK) memiliki prinsip kerja yang serupa dengan ruang tertutup, namun kinerjanya akan mengalami penurunan laju pengeringan yang signifikan pada malam hari atau saat kondisi berawan akibat hilangnya paparan radiasi matahari. Alat pengering mekanis konvensional seperti *fixed bed dryer*, *rotary drum dryer*, dan *fluidized bed dryer* mampu menghasilkan laju pengeringan awal yang sangat tinggi karena ditopang oleh sistem aliran udara paksa dari kipas pembawa panas. Laju pengeringan yang terlalu kuat pada *fixed bed* dan *rotary drum dryer* berisiko memicu gejala pengerasan permukaan biji, dimana permukaan luar biji kopi sudah mengeras dan mengunci kadar air internal di dalamnya. Kelebihan utama dari metode *fluidized bed dryer* terletak pada laju

pengeringannya yang sangat cepat dan merata, akan tetapi sistem pengering tipe ini menuntut konsumsi energi listrik yang sangat besar serta mekanisme operasional yang rumit (Ibrahim *et al.*, 2023).

4.4 Cupping test

Hasil *cupping test* menunjukkan penggunaan fermentor sebagai alat pengering biji kopi memiliki pengaruh terhadap karakteristik sensori kopi yang dihasilkan. Seluruh perlakuan menghasilkan mutu sensori yang baik dan dapat diterima. Namun demikian, terdapat kecenderungan perubahan karakter rasa seiring dengan peningkatan suhu pengeringan pada fermentor yang menunjukkan bahwa pengeringan berpengaruh terhadap senyawa penyusun cita rasa kopi. Hasil *cupping test* dapat dilihat pada **Tabel 4.1**.

Tabel 4.1 Hasil *cupping test* biji kopi robusta

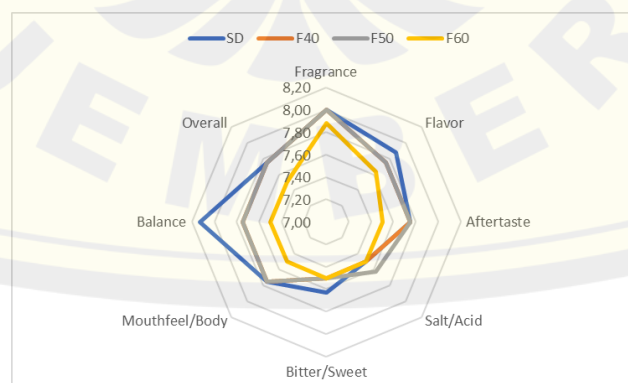
Karakteristik	Sampel			
	SD	F40	F50	F60
<i>Fragrance</i>	8.00	8.00	8.00	7.88
<i>Flavor</i>	7.88	7.75	7.75	7.63
<i>Aftertaste</i>	7.75	7.75	7.75	7.50
<i>Salt/Acid</i>	7.50	7.50	7.63	7.50
<i>Bitter/Sweet</i>	7.63	7.50	7.50	7.50
<i>Mouthfeel/Body</i>	7.75	7.75	7.75	7.50
<i>Uniform Cups</i>	10.00	10.00	10.00	10.00
<i>Balance</i>	8.13	7.75	7.75	7.50
<i>Clean Cups</i>	10.00	10.00	10.00	10.00
<i>Overall</i>	7.75	7.75	7.75	7.50
<i>Taints-Faults</i>	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>Final Score</i>	82.38	81.75	81.88	80.50
<i>Notes</i>	Brown sugar, caramelly, spicy-chili like, harsh, astringent aftertaste, nutty, chocolaty	Chocolaty, spicy-chilli like, astringent aftertaste, brown sugar, cereally, caramelly	Chocolaty, spicy-cili like, herbal	Brown sugar, toasty, nutty, spicy-chilli, chocolaty, nutty

Berdasarkan Tabel 4.1, seluruh sampel menunjukkan *final score* di atas 80.00. *Final score* tertinggi diperoleh sampel SD sebesar 82,38, diikuti oleh sampel F50 sebesar 81,88 dan F40 sebesar 81,75, sedangkan nilai terendah diperoleh pada

sampel F60 sebesar 80,50. Berdasarkan *Specialty Coffee Association* (SCA) biji kopi robusta hasil pengeringan menggunakan fermentor tergolong dalam kategori *very good* dan termasuk *specialty coffee* dikarenakan *final score* diatas 80.00 (SCA, 2018). Kopi dengan *final score* kurang dari 80 dikategorikan sebagai *non-specialty coffee*. Kopi yang memperoleh skor di atas 80 termasuk dalam kategori *specialty coffee*. Berdasarkan rentang nilainya, *specialty coffee* dikelompokkan menjadi *very good* (80,00–84,99), *excellent* (85,00–89,99), dan *outstanding* (90,00–100,00) (Moon *et al.*, 2025).

Tingginya skor *cupping test* pada perlakuan *sun drying* (82,38) dibandingkan perlakuan Fermentor diduga disebabkan oleh proses pengeringan yang berlangsung secara bertahap. Menurut Borem *et al.*, (2006), laju pengeringan yang terlalu cepat dengan suhu tinggi di atas 50 °C dapat merusak integritas membran sel biji kopi dan memicu degradasi termal pada senyawa prekursor cita rasa seperti gula sederhana dan asam amino. Kerusakan dinding sel ini menyebabkan komponen volatil dan prekursor rasa terlepas sebelum proses penyangraian. Laju pengeringan yang rendah memungkinkan akumulasi gula yang lebih tinggi pada biji-bijian dan terkait dengan adanya perlindungan pada sel biji (Le prince *et al.*, 1993)

Meskipun seluruh perlakuan sukses menembus standar *specialty*, terdapat perbedaan nilai pada beberapa atribut sensori serta keunikan profil rasa (*cupping notes*) yang dihasilkan. Perbedaan ini dipengaruhi oleh tingkat suhu pengeringan dan durasi proses pada masing-masing perlakuan dan divisualisasikan pada *spider chart* yang dapat dilihat pada **Gambar 4.4**



Gambar 4.4 Spider chart hasil *cupping test*

Pada gambar 4.4 dapat dilihat bahwa perbedaan suhu pengeringan memberikan pengaruh terhadap atribut *fragrance*, *flavor*, *aftertaste*, *salt/acid*, *mouthfeel/body*, *balance*, dan *overall*. Perlakuan F50 dan F40 memiliki nilai *fragrance* (8,00), *flavor* (7,75), serta *aftertaste* (7,75) yang lebih tinggi dibandingkan dengan perlakuan F60 yang mengalami penurunan skor. Rendahnya nilai atribut sensori pada perlakuan F60 ini disebabkan oleh penggunaan suhu pengeringan yang terlalu tinggi (60°C). Suhu yang tinggi menyebabkan laju pengeringan berlangsung terlalu cepat, sehingga senyawa-senyawa volatil ikut menguap atau rusak sebelum sempat berikatan dengan komponen di dalam biji kopi. Sementara itu, pada atribut *salt/acid*, perlakuan F50 memperoleh skor tertinggi yaitu 7,63 karena suhu 50°C merupakan kondisi optimal yang mampu menjaga kestabilan senyawa asam organik tanpa merusaknya akibat panas berlebih. Atribut *mouthfeel/body*, *balance*, dan *overall*, perlakuan F60 kembali mendapatkan skor terendah (7,50) karena suhu yang terlalu ekstrem diduga merusak komponen minyak kopi dan padatan terlarut yang berfungsi membentuk tekstur kekentalan (*body*) kopi, sehingga menghasilkan seduhan yang cenderung tipis (*flat*).

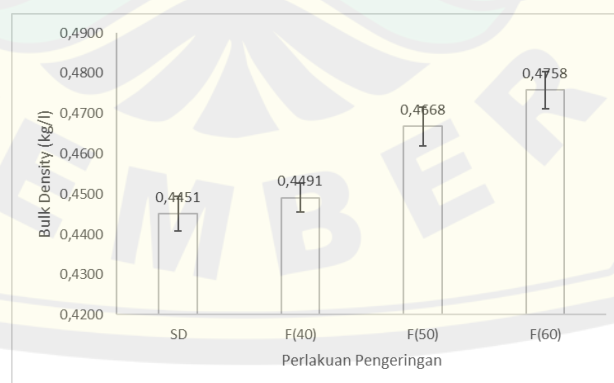
Karakteristik rasa (*cupping notes*) yang muncul pada setiap sampel juga memiliki asal-usul kimiawi yang sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan di dalam alat fermentor. Karakter rasa cokelat (*chocolaty*) dan karamel (*caramelly/brown sugar*) muncul pada seluruh sampel karena biji kopi Robusta secara alami kaya akan kandungan gula reduksi dan asam amino. Selama pengeringan dengan suhu terkontrol, terjadi reaksi pencokelatan non-enzimatis (Reaksi *Maillard*) awal yang mengubah gula tersebut menjadi senyawa aromatik khas karamel dan cokelat, yang kemudian terkunci dengan baik hingga proses penyangraian (*roasting*). Selain itu, keunikan rasa pedas seperti cabai (*spicy-chili like*) yang terdeteksi pada semua perlakuan diduga berasal dari pengaruh ruang fermentor yang digunakan. Kondisi ruang yang tertutup dan hangat pada awal proses memicu aktivitas mikroba atau kerja enzim untuk memecah asam klorogenat menjadi senyawa fenolik volatil pembawa aroma rempah (*spicy*).

Di sisi lain, terdapat beberapa karakteristik rasa spesifik yang hanya muncul pada perlakuan tertentu akibat perbedaan durasi dan intensitas panas. Karakter rasa

sepat (*astringent aftertaste*) hanya ditemukan pada perlakuan F40. Hal ini terjadi karena suhu pengeringan F40 yang rendah (40°C) membutuhkan durasi proses yang paling lama, sehingga senyawa polifenol dan asam klorogenat bebas di dalam biji kopi tidak terurai dengan sempurna dan menumpuk hingga menimbulkan rasa sepat saat diseduh. Sementara itu, karakter rasa segar dedaunan atau herbal (*herbal*) hanya muncul pada F50 karena suhu 50°C terbukti cukup hangat untuk menguapkan air tetapi tidak sampai merusak senyawa *aldehid* dan *terpenoid* alami khas tumbuhan yang ada di dalam biji kopi. Karakter rasa seperti roti panggang (*toasty*) dan kacang-kacangan (*nutty*) justru mendominasi perlakuan F60 akibat efek "kejutan panas" dari suhu 60°C yang memicu dehidrasi seluler secara cepat dan mempercepat pembentukan senyawa *pyrazine* (pembawa aroma kacang atau panggang) lebih awal dibandingkan perlakuan lainnya.

4.5 Bulk density

Densitas kamba (*bulk density*) merupakan parameter fisik yang krusial dalam menentukan karakteristik biji kopi hasil pengeringan karena berkaitan erat dengan perbandingan massa biji per satuan volume tumpukannya. Penentuan parameter fisik ini dilakukan berdasarkan standar ISO 6669:1995 yang menggunakan wadah bervolume 1 liter guna mendapatkan data yang akurat serta meminimalkan pengaruh efek dinding (*wall effect*) selama pengukuran. Berdasarkan hasil pengamatan dan analisa nilai *bulk density* dapat dilihat pada **Gambar 4.5**.



Gambar 4.5 Diagram batang *bulk density*

Berdasarkan hasil pengamatan yang disajikan pada Gambar 4.5 terlihat bahwa nilai densitas kamba (*bulk density*) biji kopi Robusta mengalami peningkatan seiring dengan kenaikan suhu pengeringan pada alat fermentor. Nilai rata-rata densitas kamba terendah terdapat pada perlakuan matahari (*Sun drying*) sebesar 0,4451 kg/l, sedangkan nilai tertinggi dicapai pada perlakuan suhu 60°C (F60) yaitu sebesar 0,4758 kg/l. Pengukuran ini dilakukan menggunakan wadah bervolume 1 liter pada standar ISO 6669:1995. Pemilihan volume tersebut bertujuan untuk menjamin keterwakilan sampel serta meminimalkan pengaruh efek dinding (*wall effect*) saat pengisian biji ke dalam wadah ukur, sehingga diperoleh nilai kerapatan yang akurat dan representatif.

Perbedaan nilai densitas kamba antara pengeringan alami dan mekanis dipengaruhi oleh stabilitas lingkungan selama proses pengeringan berlangsung. Perlakuan cenderung menghasilkan nilai kerapatan yang lebih rendah karena proses penguapan air sangat bergantung pada kondisi cuaca yang fluktuatif. Hal ini sejalan dengan penelitian Maneerat *et al.*, (2024) yang menyatakan bahwa variasi cuaca musiman berpengaruh signifikan terhadap atribut fisik biji kopi Robusta. Kondisi pengeringan yang tidak stabil pada metode konvensional menyebabkan penyusutan volume biji menjadi tidak seragam, berbeda dengan penggunaan alat fermentor yang mampu menjaga konsistensi suhu dan aliran udara panas.

Kenaikan nilai densitas kamba pada perlakuan fermentor berkaitan dengan laju penurunan kadar air di dalam biji. Penurunan kadar air yang diatur secara mekanis memicu terjadinya pengerutan struktur fisik biji secara lebih teratur dan kompak. Niwagaba (2019) menjelaskan bahwa terdapat hubungan linier antara kadar air dan kerapatan fisik pada kopi Robusta. Pengeringan yang efisien pada suhu 50°C dan 60°C memungkinkan air keluar dari jaringan seluler secara optimal, sehingga menghasilkan susunan biji yang lebih rapat dalam wadah ukur karena ukuran biji yang lebih seragam dan padat.

Tingkat keseragaman dan variasi data dari proses pengeringan dapat dilihat melalui *error bar* yang ada pada setiap diagram batang perlakuan. Perlakuan F40 menunjukkan rentang *error bar* yang paling pendek dibandingkan dengan seluruh perlakuan lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa variasi data antar-ulangan pada

suhu 40°C sangat kecil, sehingga data yang dihasilkan lebih homogen dan konsisten. Kondisi tersebut terjadi karena alat Fermentor mampu mendistribusikan panas secara merata pada setiap ulangan sampel meskipun berada pada suhu yang rendah.

Sebaliknya, perlakuan F50 dan F60 memiliki rentang *error bar* yang paling panjang. Hal ini menunjukkan bahwa pada proses pengeringan dengan suhu yang lebih tinggi, variasi data antar-ulangan cenderung meningkat atau kurang seragam. Tingginya variasi data pada suhu tinggi ini diduga terjadi karena laju penguapan air yang berlangsung sangat cepat, sehingga menyebabkan tingkat pengerutan fisik biji kopi menjadi tidak seragam di dalam tumpukan sampel pada setiap ulangan. Sementara itu, perlakuan SD menunjukkan rentang *error bar* yang sedang atau berada di tingkat menengah. Variasi data pada metode SD ini termasuk wajar untuk pengeringan konvensional, karena energi radiasi matahari dan kelembapan udara lingkungan sekitar sangat tidak menentu (fluktuatif) serta tidak dapat diatur selama proses penjemuran berlangsung.