



STUDI PENGARUH TEMPERATUR *ROASTING* DAN KECEPATAN UDARA TERHADAP KINERJA MESIN *ROASTING FLUID-BED* BIJI KOPI

Muhammad Syaukani^{a*}, Gilang Handi Wibowo^a, Fajar Perdana Nurullah^a, Teuku Meurah Indra Riayatsyah^a

^aProgram Studi Teknik Mesin, Jurusan Teknik Mesin, Institut teknologi Sumatera, Jl. Terusan Ryacudu, Way Huwi, Kec. Jati Agung, Kabupaten Lampung Selatan, Lampung 35365, Indonesia

*Corresponding authors at: Email: muhammad.syaukani@ms.itera.ac.id (M.Syaukani) Tel.: +62895-0660-1990

INFOARTIKEL

Riwayat artikel:

Diajukan pada 15 Januari 2024

Direvisi pada 04 Februari 2024

Disetujui pada 20 Februari 2024

Tersedia daring pada 02 Maret 2024

Kata kunci:

Roasting, biji kopi, temperatur roasting, fluid-bed.

Keywords:

Roasting, coffee bean, roasting temperature, fluid-bed.

ABSTRAK

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui kinerja mesin *fluid-bed roaster* biji kopi dengan variasi temperatur *roasting* dan kecepatan udara. Sampel yang digunakan adalah biji kopi robusta dengan kadar air rata-rata 13% dan massa 100 gram. Variasi temperatur *roasting* yang digunakan yaitu 200°C, 210°C, 220°C dan 230°C. Kecepatan udara yang divariasikan sebesar 3 m/s, 3,5 m/s dan 4 m/s. Tingkat kematangan biji kopi hasil *roasting* yang ingin dicapai adalah pada tingkat *medium roast* dan *dark roast*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa temperatur *roasting* sebesar 230°C dan kecepatan udara 4 m/s adalah variasi parameter terbaik untuk mendapatkan tingkat kematangan *medium roast* dan *dark roast*. Tingkat kematangan *medium roast* dicapai pada waktu *roasting* 16,41 menit, laju penguapan air sebesar 0,001 kg/menit dengan kadar air biji kopi sebesar 2,6%. Tingkat kematangan *dark roast* memerlukan waktu *roasting* selama 20,40 menit, laju penguapan air sebesar 0,0012 kg/menit dengan kadar air 1,73%. *Roasting uniformity* yang terbaik yaitu pada tingkat kematangan *medium roast* sebesar 82,25%, sedangkan *dark roast* sebesar 81,7%. Laju perpindahan panas adalah 4709,71 W dengan koefisien perpindahan panas sebesar 94,97 W/m².K.

ABSTRACT

This investigation was carried out with the purpose of determining the effectiveness of a coffee roaster machine of the fluid bed type with a number of different roasting parameters (or parameters). The samples that were utilised in this examination were robusta coffee beans that had a mass of one hundred grammes and an average moisture content of thirteen percent. Variations in maturity level, temperature, and air velocity are the variables that are utilised in the process of evaluating the operating performance of this fluid bed roasting machine. The temperature is changed in four different ways: 200 degrees Celsius, 210 degrees Celsius, 220 degrees Celsius, and 230 degrees Celsius. The airspeed ranged from 3.0 metres per second to 3.5 metres per second to 4.0 metres per second. When it comes to the maturity level of medium and dark roasts, the ideal roasting maturity speed is roasting with a temperature of 230 degrees Celsius for 16.41 minutes with a moisture content of 2.6% for medium doneness, and 20.40 minutes with a moisture content of 1.73% for dark roast maturity level. The highest uniformity of 85.25% was attained by the air flow rate of 4.0 metres per second throughout the test. Additionally, the heat insulation value was 4709.71 watts, and the heat absorber value was 94.97 watts per square metre..

1. PENGANTAR

Kopi merupakan salah satu tumbuhan yang menjadi sumber pendapatan di Indonesia. Produksi kopi semakin bertambah setiap tahunnya dengan total produksi kopi di Indonesia diperkirakan sebesar 729.074ton pada tahun 2019 (Direktorat Jenderal Perkebunan, 2019). Pertumbuhan produksi kopi di Indonesia berpengaruh pesat terhadap peningkatan konsumsi kopi di Indonesia. Menurut data *United State Department of Agriculture* (USDA), pertumbuhan konsumsi kopi di Indonesia mencapai 7,77% selama rentang waktu 2015-2018 (Triyanti, 2016). Biji kopi tidak bisa langsung dikonsumsi, melainkan harus dilakukan pengolahan menjadi bentuk akhir berupa bubuk. Pengolahan biji kopi sampai menjadi bubuk melewati dua proses, yaitu pengolahan kopi primer dan sekunder. Pengolahan kopi primer meliputi penyortiran buah kopi yang sehat, pengupasan kulit buah kopi, pengemasan dan penyimpanan. Sedangkan pengolahan sekunder

pada kopi yaitu proses pengeringan (*drying*), proses *roasting* dari biji kopi *green bean* menjadi *roast bean*, dan penggilingan (*grinding*) menjadi biji kopi menjadi bubuk kopi (Budiyanto dkk., 2021).

Proses pengolahan kopi sendiri tidak terlepas dari (*roasting*). Proses *roasting* dilakukan dengan menggunakan alat yang disebut dengan *roaster*. Pada umumnya mesin *roasting* dibedakan menjadi dua yaitu *drum roaster* dan *fluid-bed roaster*. *Drum roaster* merupakan mesin *roasting* kopi berbentuk silinder berputar dengan panas yang disalurkan melalui proses konduksi. Sedangkan *fluid-bed roaster* merupakan mesin *roasting* kopi yang beroperasi menggunakan prinsip fluidisasi yang memanfaatkan udara sebagai penghantar panas dan juga sebagai pengaduk kopi (Safitri dkk., 2019). Fluidisasi adalah suatu keadaan ketika terdapat material bertumpuk yang bergerak karena adanya aliran udara yang melewati tumpukan sehingga material tersebut memiliki sifat seperti fluida (mengalir). Fluidisasi sangat dipengaruhi oleh kecepatan dan tekanan udara yang melewati tumpukan material (Mulato, 2018). Kecepatan udara pada *fluid-bed roaster* biji kopi direkomendasikan sebesar 5 m/s pada penelitian (Rahayuningtyas dkk., 2023). (Putra dkk., 2019) menggunakan kecepatan udara pada proses *fluid-bed roaster* sebesar 2,5 m/s. Kecepatan udara yang digunakan perlu dipertimbangkan karena akan berpengaruh terhadap proses fluidisasi biji kopi selama proses *roasting*. Kecepatan udara yang rendah akan menyebabkan fluidisasi tidak terjadi, sedangkan kecepatan udara yang terlalu besar dapat menyebabkan biji kopi matang lebih cepat hingga menjadi hangus sehingga akan menurunkan kualitas biji kopi hasil *roasting*. Selain itu, kecepatan udara disesuaikan juga dengan kapasitas mesin *fluid-bed roaster* yang digunakan serta kapasitas biji kopi yang akan dilakukan proses *roasting* (Eko dkk., 2015).

Proses *roasting* merupakan inti dari pembentukan karakteristik rasa dan aroma kopi dan kualitas kopi. Terdapat tiga faktor yang harus diperhatikan selama proses *roasting* untuk menghasilkan biji kopi *roasting* yang berkualitas yaitu temperatur *roasting*, waktu *roasting*, metode pengadukan serta kadar air yang sesuai menurut SNI (Widodo dkk., 2015). Berdasarkan temperatur *roasting*, tingkat kematangan dibedakan menjadi 3 yaitu *ligh roast*, *medium roast*, dan *dark roast*. (Widodo dkk., 2015) melakukan proses *roasting* menggunakan *prototipe* mesin *roasting* tipe *fluid-bed roaster* dengan sampel biji kopi 300 g dan waktu *roasting* yang konstan 10 menit. Hasil Penelitian menunjukkan bahwa temperatur yang dibutuhkan bergantung pada tingkat kematangan yang diinginkan yaitu 200°C (*light roast*), 220°C (*medium roast*), dan 230°C (*dark roast*). (Selling Coffee Online, 2022) menyatakan bahwa proses *roasting* terdiri dari *drying*, *browning*, dan *smoking* dengan temperatur *ideal roasting* berturut-turut adalah 200-220°C, 220-240°C, dan 240-260°C. Temperatur *roasting* juga akan mempengaruhi kandungan *chlorogenic acid* yang berfungsi sebagai antioksidan sehingga akan berpengaruh terhadap kualitas biji kopi (Misto dkk., 2022).

Pada saat proses *roasting* terjadi kehilangan berat kering karena terjadi penguapan kadar air yang akan mempengaruhi kualitas kopi hasil *roasting*. Kehilangan berat kering berhubungan langsung dengan temperatur dan lama waktu *roasting*. Proses *roasting* dibedakan menjadi dua yaitu HTST (*High Temperatur Short Time*) dan LTLT (*Low Temperatur Long Time*). (Putra dkk., 2019) melakukan penelitian menggunakan mesin *fluid-bed roaster* menggunakan metode *roasting* dengan proses HTST dan LTLT dengan sampel kopi *green bean* sebesar 1 kg. Penelitian tersebut menyatakan bahwa pada proses HTST, pada kecepatan udara 2,5 m/s dan temperatur udara 250°C akan membutuhkan waktu *roasting* 5 menit dengan nilai laju perpindahan panas (q) sebesar 3399,63W. Sedangkan proses proses LTLT, kecepatan udara 2,5 m/s dan temperatur udara 220°C membutuhkan waktu *roasting* 12 menit dengan nilai laju perpindahan panas (q) sebesar 3091,49 W.

Berdasarkan uraian di atas maka penelitian ini akan difokuskan pada kinerja mesin *fluid-bed roaster*. Hal ini dikarenakan data penelitian yang menggunakan mesin *fluid-bed roaster* mengenai proses *roasting* yang tepat untuk menghasilkan biji kopi *roasting* berkualitas masih terbatas. Penelitian yang ada hanya menunjukkan proses *roasting* untuk menghasilkan biji kopi *roasting* yang berkualitas menggunakan mesin *fluid-bed roaster*. Sehingga penelitian perlu dilakukan untuk menganalisis proses *roasting* biji kopi berdasarkan kadar air yang ditinjau dari karakteristik fisik.

2. METODE PENELITIAN

Kinerja mesin *fluid-bed roaster* biji kopi diuji dengan melakukan *roasting* biji kopi mentah menjadi biji kopi matang yang siap untuk proses *grinding* menjadi bubuk kopi. Parameter uji yang divariasikan yaitu temperatur *roasting* dan kecepatan udara selama proses *roasting*. Dari pengujian ini, kualitas hasil *roasting* biji kopi dapat ditentukan berdasarkan tingkat kematangan yang dilihat dari warna biji kopi. Dengan demikian, hasil pengujian ini dapat mengetahui parameter operasi mesin *fluid-bed roaster* yang tepat untuk menghasilkan biji kopi *roasted* sesuai dengan kualitas yang diinginkan. Selain itu, pengujian kinerja mesin ini juga akan menganalisis aspek perpindahan panas yang terjadi selama proses *roasting*. Karena perpindahan panas merupakan faktor penting yang menentukan kualitas biji kopi *roasted* dan menilai kinerja dari mesin *fluid-bed roaster*.

2.1 Asumsi dan ruang lingkup penelitian

- Sampel yang digunakan adalah biji kopi *green bean* jenis kopi robusta yang tersedia di daerah tempat penelitian dilakukan. Massa sampel biji kopi *green bean* 100 g dan kadar air rata-rata 13% sebelum proses *roasting* dilakukan.
- Kadar air biji kopi maksimal setelah proses *roasting* yang diperbolehkan menurut SNI (01- 3542-2004) adalah 7% (Suseno dkk., 2020)
- Jenis mesin *roasting* biji kopi yang digunakan adalah *fluid-bed roaster* dengan spesifikasi sebagai berikut:

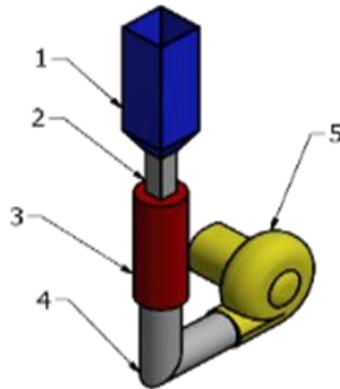
Bahan <i>chamber</i>	= Pelat <i>stainless steel</i>
Volume <i>chamber</i> penampung kopi	= 10x10x20 (panjang x lebar x tinggi)
Heater	= Heating element 1600 W
Blower	= Blower NRT 260W, 3000 rpm
Power Supply	= AC 220 V
- Variasi temperatur yang digunakan pada saat pengujian adalah 200°C; 210°C; 220 °C; dan 230°C.
- Variasi laju aliran udara yang digunakan pada saat pengujian keseragaman hasil *roasting* adalah 3 m/s; 3,5 m/s; dan 4 m/s.
- Waktu pengujian perubahan warna kematangan dilakukan selama 10 menit.
- Mode perpindahan panas yang dominan adalah perpindahan panas konveksi.

- h. Korelasi bilangan *Nusselt* yang digunakan untuk analisis laju perpindahan panas yaitu kasus fluidisasi *non-isothermal* antara partikel solid dan gas.
- i. Dimensi biji kopi diasumsikan dalam bentuk bola.
- j. *Heatloss* pada saat proses *roasting* diabaikan.

2.2 Desain Skema Alat dan Sistem Pengujian

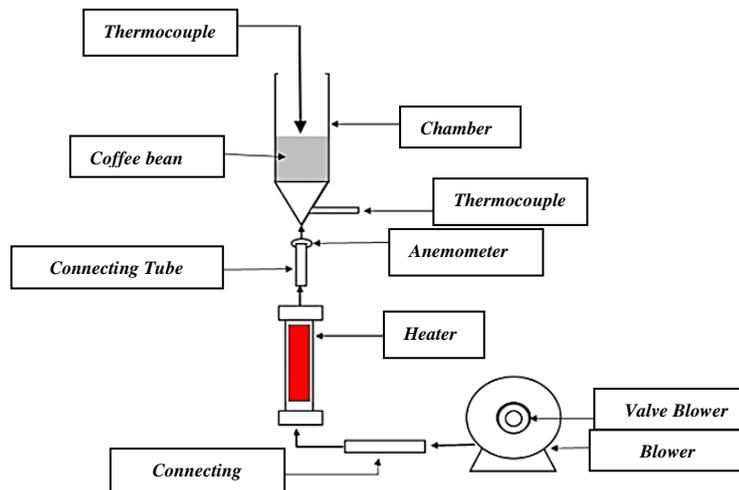
Desain mesin *fluid-bed roaster* pada penelitian ini terdiri dari 5 komponen utama, yaitu sebagai berikut:

1. *Roasting Chamber* → ruang untuk biji kopi mentah yang akan dilakukan proses *roasting*.
2. *Airflow inlet ducting* → saluran udara masuk dilengkapi dengan *thermocouple* dan *anemometer*.
3. *Heater chamber* → ruang pemanas yang terdapat komponen pemanas untuk memanaskan udara bertekanan yang melewatinya.
4. *Connecting tube* → komponen sambungan antara saluran udara yang disuplai oleh *fan blower* dengan saluran *inlet* yang akan masuk ke *heater chamber*
5. *Fan Blower* → komponen untuk menyuplai aliran udara bertekanan untuk proses *roasting*.



Gambar 1. Desain mesin *fluid-bed roaster*

Fluida bertekanan yang dihasilkan oleh *fan-blower* mendorong panas yang dihasilkan oleh *heater* yang kemudian memanaskan udara. Udara panas tersebut kemudian mendorong kopi sehingga kopi berputar dan berotasi yang mengakibatkan kopi memiliki sifat fluida (*Fluidism*). Temperatur udara masuk akan ditangkap oleh *thermocouple* yang kemudian disesuaikan dengan temperatur yang diinginkan. Skema pengujian dari mesin *fluid-bed roaster* dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Skema sistem pengujian mesin *fluid-bed roaster*

2.3 Parameter Pengujian Kinerja Mesin Fluid-bed Roaster

1. Perpindahan Panas Konveksi

Parameter penting untuk mencari perpindahan panas konveksi paksa eksternal adalah menentukan koefisien konveksi rata-rata yang diperoleh menggunakan korelasi bilangan *Nusselt* rata-rata yang diasumsikan dapat berlaku untuk kasus fluidisasi selama proses *roasting*. Korelasi bilangan *Nusselt* (\overline{Nu}_D) diformulasikan seperti pada Persamaan 1 (Incropera and DeWitt, 2017) berikut ini.

$$\overline{Nu}_D = 2 + (0,4 \cdot Re^{\frac{1}{2}} + 0,06 \cdot Re^{\frac{2}{3}}) Pr^{0,4} \left(\frac{\mu}{\mu_s}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (1)$$

Bilangan *Prandtl* (Pr), μ , bilangan *Reynolds* (Re) ditentukan dari sifat udara pada temperatur rata-rata keluar dan masuk $\Delta T = (T_{in} + T_{out})/2$ *roasting chamber*, sedangkan μ_s pada temperatur permukaan biji kopi (T_s). μ dan μ_s merupakan viskositas dinamik. Bilangan *Reynolds* dapat dicari menggunakan **Persamaan 2** (Incropera and DeWitt, 2017) di bawah ini.

$$Re = \frac{VD_{cb}}{\nu} \quad (2)$$

Dimana ν adalah viskositas kinematik, V adalah kecepatan udara yang melewati *roasting chamber*, sedangkan D_{cb} adalah diameter hidrolis sejumlah biji kopi yang terdapat di dalam *roasting chamber*. Sehingga D_{cb} dapat ditentukan menggunakan pendekatan **Persamaan 3** (Putra dkk., 2019) di bawah, Dimana V_{cb} adalah volume total sejumlah biji kopi yang selama proses *roasting*.

$$D_{cb} = \left(\frac{6V_{cb}}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

Kemudian, koefisien konveksi rata-rata *roasting* biji kopi (\bar{h}) dapat ditentukan menggunakan **Persamaan** (Incropera and DeWitt, 2017). k menyatakan nilai konduktivitas termal udara yang diperoleh dari sifat udara pada ΔT .

$$\bar{h} = \overline{Nu}_D \frac{k}{D_{cb}} \quad (4)$$

Nilai perpindahan panas proses *roasting* (q_r) dapat dicari menggunakan **Persamaan 5** (Incropera and DeWitt, 2017), Dimana A_{cb} adalah luas area sejumlah biji kopi yang terdapat di dalam *roasting chamber*, sedangkan ΔT_{lm} diperoleh menggunakan **Persamaan 6** (Incropera and DeWitt, 2017).

$$q_r = \bar{h}A_{cb}\Delta T_{lm} \quad (5)$$

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_s - T_{in}) - (T_s - T_{out})}{\ln \left[\frac{T_s - T_{in}}{T_s - T_{out}} \right]} \quad (6)$$

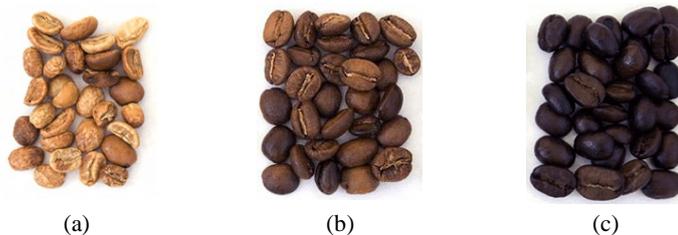
2. Kadar Air Biji Kopi Hasil Roasting

Kadar air merupakan banyaknya kandungan air per satuan massa kopi. Kadar air biji kopi *green bean* berkisar 11-13%. Kadar air biji kopi akan mengalami penurunan saat temperatur mengalami peningkatan. Perlakuan panas saat proses *roasting* sangat berpengaruh pada kadar air kopi *roast bean* Menurut Coffee and Cocoa Training Center, kadar air biji kopi *roast bean* bervariasi dari 1-4% tergantung pada bahan yang digunakan, tingkat kematangan, waktu *roasting*, dan proses pendinginan (Mulato, 2018). Kematangan *roast bean* tingkat *medium roast* memiliki kadar air 2-3% sedangkan pada tingkat *dark roast* kadar airnya berkisar 1-2%. Nilai ini lebih rendah dibanding SNI (01-3542-2004) yaitu nilai batas maksimum untuk kadar air adalah 7%. Penurunan kadar air pada kopi dikarenakan adanya penguapan sejumlah uap air yang terkandung dalam rentang waktu tertentu selama proses *roasting*. Besarnya laju penguapan air yang terkandung di dalam biji kopi selama proses *roasting* dirumuskan menggunakan **Persamaan 7** (Santoso dkk., 2023) di bawah ini. m_i adalah massa kopi *green bean*, sedangkan m_f adalah massa kopi hasil *roasting*.

$$\dot{m}_a = \frac{m_i - m_f}{t} \quad (7)$$

3. Tingkat Kematangan Biji Kopi Hasil Roasting

Menurut (National Coffee Association (NCA), 2023), tingkat kematangan *roast bean* dibedakan menjadi beberapa tingkat kematangan, yaitu sebagai berikut:



Gambar 3. Tingkat kematangan *roast bean*. (a) *light roast*, (b) *medium roast*, (c) *dark roast*

a. Light Roast

Pada tingkat ini biji kopi berwarna coklat kekuningan, karakternya ringan dari sisi biji dan tidak memiliki lapisan minyak di permukaan. Tingkat kematangan *light roast* ini mengandung kafein lebih tinggi dari tingkat kematangan lainnya.

b. *Medium Roast*

Tingkat *medium roast* memiliki kandungan gula alami dan sudah mulai berkaramel, serta tingkat keasaman mulai menurun. Kualitas kopi pada tingkat ini sangat menonjol untuk dilakukan proses *roasting*. Hal ini karena tingkat kematangan ini telah muncul rasa, aroma, dan kandungan *chlorogenic acid* pada biji kopi.

c. *Dark Roast*

Pada tingkat *dark roast* memiliki karakteristik warna cokelat gelap menuju kehitaman, memiliki lapisan minyak pekat di permukaan yang dapat terlihat pada permukaan cangkir ketika kopi sudah diseduh. Rasa pahit menjadi lebih menonjol dari pada asam, aroma dan karakter rasa semakin berkurang.

4. *Roasting Uniformity*

Roasting uniformity atau keseragaman *roasting* dapat dianalisis melalui visual melalui persentase keseragaman yang dapat diketahui dari selisih antara massa biji kopi hasil *roasting* dengan massa biji kopi hasil *roasting* yang memiliki warna berbeda terhadap waktu *roasting*. Biji kopi yang disangrai tidak merata adalah biji kopi yang menunjukkan warna lebih terang atau lebih gelap dibandingkan dengan keseluruhan (Taqwim dkk.,2018). Keseragaman hasil sangrai dapat diketahui dengan menggunakan **Persamaan 8** (Paramida dkk., 2022) di bawah ini. c_f adalah massa akhir biji kopi, dan w_{nub} adalah massa biji kopi yang memiliki warna kematangan yang tidak merata.

$$Roasting\ Uniformity = \frac{(c_f - w_{nub})}{c_f} \times 100\% \quad (8)$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 *Tingkat Kematangan Biji Kopi Hasil Roasting*

Proses *roasting* menggunakan 4 variasi temperatur, yaitu 200 °C, 210 °C, 220 °C, dan 230 °C dengan kecepatan udara konstan yaitu 4 m/s waktu *roasting* 10 menit. Proses menuju kematangan sangrai biji kopi yang dipengaruhi oleh temperatur dan memiliki beberapa tahapan warna yang telah digolongkan kedalam tingkat kematangan tertentu. **Tabel 1** menunjukkan tingkat kematangan biji kopi hasil *roasting* pada berbagai variasi temperatur *roasting*.

Tabel 1. Tingkat Kematangan *Roast Bean* Pada Beberapa Variasi Temperatur *Roasting*

T (°C)	t (menit)	V (m/s)	Pengamatan visual	Tingkat Kematangan
200	10	4		<i>Light</i>
210	10	4		<i>Light</i>
220	10	4		<i>Light</i>
230	10	4		<i>Light</i>

Dari gambar di atas biji kopi hasil *roasting* untuk setiap variasi temperatur tidak menunjukkan perbedaan tingkat kematangan yang signifikan. Hal ini disebabkan oleh perbedaan variasi temperatur yang digunakan tidak berbeda jauh jika diuji pada waktu *roasting* dan kecepatan udara yang konstan. Hasil penelitian ini sesuai dengan penelitian (Sasongko dkk., 2018) yang menyatakan bahwa perbandingan antara setiap variasi temperatur yang tidak terlalu tinggi akan menghasilkan perbedaan kecerahan warna dan *uniformity* kematangan hasil *roasting* yang tidak signifikan saat proses awal *roasting* dilakukan. Namun, tingkat kematangan hasil *roasting* yang ingin dicapai pada

kondisi *medium roast* dan *dark roast* membutuhkan waktu yang lebih lama yaitu lebih dari 10 menit. **Tabel 2** menunjukkan merupakan warna kematangan hasil *roasting* pada tingkat *medium roast* dan *dark roast* untuk berbagai variasi temperatur *roasting*.

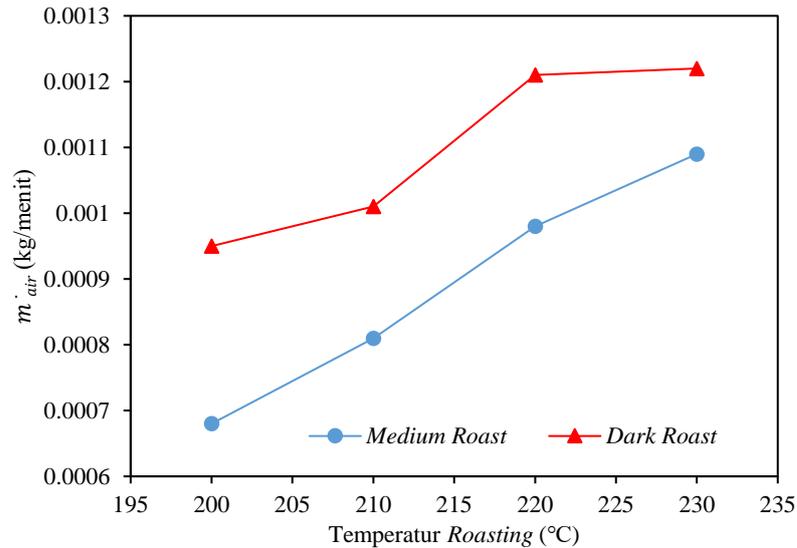
Tabel 2. Warna Biji Kopi Hasil *Roasting* Pada Tingkat Kematangan *Medium Roast* Dan *Dark Roast*

Temperatur	<i>Medium Roast</i>	<i>Dark Roast</i>
200°C		
210°C		
220°C		
230°C		

3.2 Laju Penguapan Air Selama Proses *Roasting*

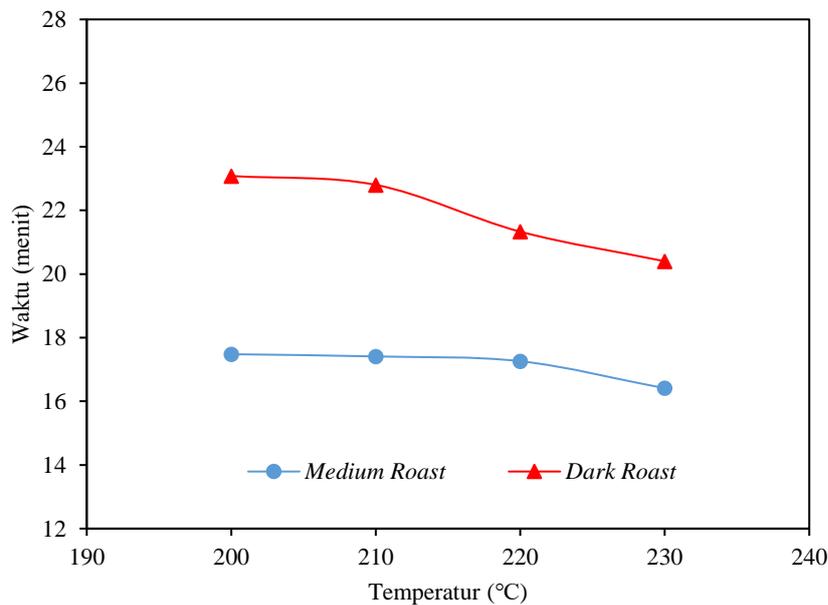
Laju penguapan air selama proses *roasting* diperoleh dari pengujian menggunakan kecepatan udara sebesar 4 m/s. Sedangkan variasi temperatur *roasting* yang digunakan, yaitu 200°C, 210°C, 220°C, dan 230°C. Laju penguapan air pada tiap variasi temperatur diketahui dari perubahan massa biji kopi selama waktu *roasting*. Waktu *roasting* yaitu waktu yang dibutuhkan oleh biji kopi *green bean* menjadi *roast bean* dengan tingkat kematangan *medium roast* dan *dark roast*. Sampel biji kopi *green bean* yang digunakan adalah jenis robusta. Kadar airnya yaitu 13% yang diperoleh dari pengukuran kadar air rata-rata sebelum pengujian dilakukan. Hal ini juga sesuai dengan penelitian (Alhabsy dkk., 2021) yang menyatakan bahwa kadar air biji kopi jenis robusta yaitu 11-13%.

Gambar 4 menunjukkan bahwa laju penguapan air pada biji kopi meningkat seiring variasi temperatur yang digunakan. Semakin besar temperatur yang digunakan maka semakin besar laju penguapan air yang terjadi. Pada temperatur 200°C, laju penguapan massa air sebesar 0,00068 kg/menit dan 0,00095 kg/menit berturut-turut untuk tingkat kematangan *medium roast* dan *dark roast*. Pada temperatur 210°C, laju penguapan massa air meningkat menjadi 0,0008 kg/menit dan 0,001 kg/menit berturut-turut untuk tingkat kematangan *medium roast* dan *dark roast*. Pada tingkat kematangan *dark roast* perubahan laju penguapan air tidak signifikan atau dapat dikatakan relatif tetap yaitu memiliki kadar air 1,7%. Dengan demikian, kenaikan temperatur *roasting* di atas 220°C tidak memberikan pengaruh yang besar untuk menghilangkan kadar air pada biji kopi hasil *roasting*. Namun, pada tingkat kematangan *medium dark*, laju penguapan air masih mengalami peningkatan jika temperatur *roasting* ditingkatkan hingga 230°C. Laju penguapan air paling rendah yaitu pada temperatur 200°C sebesar 0,00068 kg/menit untuk tingkat kematangan *medium roast* dan 0,00095 kg/menit untuk tingkat kematangan *dark roast*. Sedangkan laju penguapan air paling tinggi terdapat pada temperatur 230°C yaitu 0,001 kg/menit untuk tingkat kematangan *medium roast* dan 0,0012 kg/menit untuk tingkat kematangan *dark roast*. Dengan demikian, dapat dikatakan bahwa peningkatan laju penguapan air biji kopi berbanding lurus dengan temperatur *roasting*.



Gambar 4. Laju penguapan air biji kopi terhadap temperatur roasting pada tingkat kematangan medium roast dan dark roast

Tingkat kematangan hasil *roasting* biji kopi yang ingin dicapai juga harus mempertimbangkan waktu *roasting*. Grafik yang menunjukkan pengaruh temperatur roasting terhadap waktu *roasting* berdasarkan tingkat kematangan *medium roast* dan *dark roast* dapat dilihat pada Gambar 5. Tingkat kematangan hasil *roasting* yang terbaik yaitu pada temperatur roasting sebesar 230°C. Pada temperatur roasting 230°C tingkat kematangan *medium dark* dan *dark roast* hanya membutuhkan waktu berturut-turut sekitar 16,41 menit dengan kadar air 2,6% dan 20,40 menit dengan kadar air 1,73%. Data yang didapat menunjukkan bahwa semakin besar temperatur yang digunakan untuk mencapai tingkat kematangan yang diinginkan maka waktu yang dibutuhkan untuk melakukan proses *roasting* akan semakin singkat. Hal ini sesuai dengan penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh (Sutarsi dkk., 2016). Tingkat kematangan yang ingin dicapai perlu mempertimbangkan waktu *roasting* sebagai acuan untuk melakukan proses *roasting* yang efisien karena akan berpengaruh terhadap energi listrik yang dibutuhkan selama *roasting* berlangsung.



Gambar 5 Hubungan antara waktu dengan temperatur roasting

3.3 Roasting Uniformity

Saat proses *roasting* berlangsung, biji kopi juga akan mengalami penurunan berat fisik, kadar air dan perubahan warna karena adanya perlakuan panas. Biji kopi hasil *roasting* yang berkualitas adalah biji kopi dengan warna kematangan yang seragam (*uniform*). Beberapa hal yang mempengaruhi *roasting uniformity* warna kematangan kopi, yaitu ketidakseragaman kadar air, dan pengadukan biji kopi selama proses *roasting*. Pada *fluid-bed roaster*, pengadukan dibantu oleh udara yang dihembuskan dari *blower* melalui *heater* sehingga dapat membantu proses perpindahan panas yang terjadi selama *roasting* berlangsung. Pengujian *roasting uniformity* bertujuan untuk mengetahui kecepatan udara yang lebih efektif sebagai acuan menentukan parameter proses *roasting*.

Gambar 6 menunjukkan bahwa *roasting uniformity* tertinggi 81,7% untuk mencapai tingkat kematangan *dark roast* dan 82,25% *medium roast* pada kecepatan udara sebesar 4 m/s. hal ini karena kopi temperatur udara yang mengalir pada kecepatan tersebut akan mengakibatkan biji kopi dapat berotasi dengan baik mengimbangi temperatur udara yang besar sehingga *roasting uniformity* cukup baik. *Roasting uniformity* yang diperoleh paling kecil dibandingkan lainnya yaitu dengan nilai 78,5% untuk kematangan *dark roast* dan 80,5%

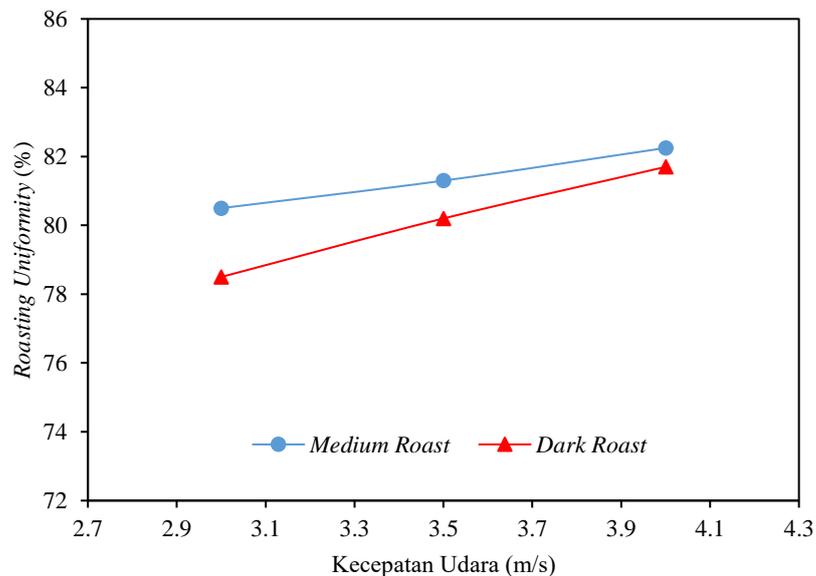
untuk kematangan *medium roast*. Hal ini karena pada kondisi tersebut kopi tidak berotasi sempurna. Kecepatan yang rendah menimbulkan dorongan udara yang lemah sehingga beberapa sisi kopi terbakar dan memiliki warna lebih gelap yang disebabkan oleh temperatur tinggi. Namun, kondisi tersebut tidak diimbangi oleh rotasi kopi yang baik sehingga berdampak pada beberapa bagian kopi memiliki wana yang lebih terang dibanding lainnya. Hal ini juga karena ada beberapa bagian kopi tidak mendapatkan perlakuan panas yang sempurna. Pada laju aliran udara 3,5 m/s, kopi dapat berotasi dengan baik dan nilai keseragaman yang didapatkan lebih besar dari laju aliran udara 3 m/s. Namun, terdapat beberapa bagian biji kopi yang terlihat lebih terang dari biji kopi lainnya. Selain itu, kecepatan udara sebesar 3 m/s dan 3,5 m/s memerlukan waktu *roasting* yang lebih lama dibandingkan kecepatan udara 4 m/s.

Kecepatan udara pada 4 m/s memiliki *roasting uniformity* yang paling besar. Hal ini sesuai dengan penelitian (Mojica dkk., 2010) yang menyatakan bahwa perlakuan panas yang tinggi harus diimbangi oleh rotasi yang tinggi juga karena semakin tinggi kecepatan udara yang digunakan maka nilai *non-uniformity* selama proses *roasting* yang didapatkan akan semakin rendah. *Uniformity* hasil *roasting* dapat dilihat pada **Gambar 7** berikut ini.



Gambar 6. Non-uniformity hasil *roasting*

Roasting uniformity juga dipengaruhi oleh faktor eksternal yaitu kesalahan selama proses sortir sampel biji kopi, seperti dimensi kopi yang berbeda dan kadar air biji kopi yang tidak seragam. Menurut (BSN, 2008), secara umum biji kopi digolongkan menjadi 3 ukuran yaitu ukuran besar, sedang dan kecil. Biji kopi yang memiliki ukuran lebih kecil akan lebih cepat mengalami perubahan warna kematangan serta penurunan kadar air sehingga akan muncul beberapa biji kopi yang memiliki warna lebih gelap. Setiap kadar air biji kopi berbeda-beda dikarenakan terjadinya proses perlakuan yang mengakibatkan warna kematangan tidak *uniform*. Hal ini sesuai dengan penelitian (Sary dkk., 2017) yang menyatakan bahwa proses *roasting* adalah proses perlakuan panas untuk menurunkan kadar air biji kopi. Biji kopi yang memiliki kadar air tinggi akan membutuhkan waktu *roasting* yang lebih lama sehingga setelah proses *roasting* akan menimbulkan warna yang lebih cerah dan mempengaruhi nilai *roasting uniformity* (Raja dkk., 2018).



Gambar 7. Pengaruh kecepatan udara terhadap *uniformity roasting*

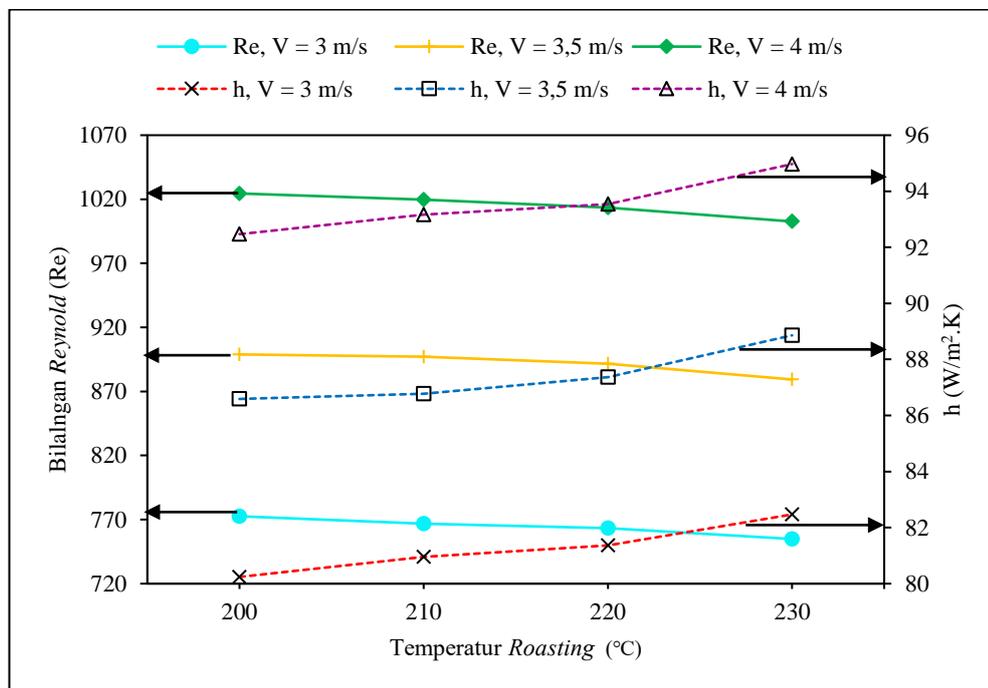
3.4 Karakteristik Perpindahan Panas Selama Proses *Roasting*

Karakteristik perpindahan panas selama proses *roasting* perlu dikaji untuk mengetahui pengaruh variasi temperatur *roasting* dan kecepatan udara yang digunakan terhadap proses *roasting* yang optimal. Aliran udara panas pada biji kopi di dalam *roasting chamber* diasumsikan sebagai aliran laminar. Bilangan *Reynolds* (Re) dan bilangan *Nusselt* (Nu) merupakan parameter yang menentukan besarnya koefisien perpindahan panas konveksi (h) yang merupakan faktor yang mempengaruhi laju perpindahan panas. **Gambar 8-9** menunjukkan hubungan antara temperatur *roasting* dan kecepatan udara terhadap karakteristik perpindahan panas yaitu laju perpindahan panas (q), bilangan *Reynolds* (Re) dan koefisien perpindahan panas (h).

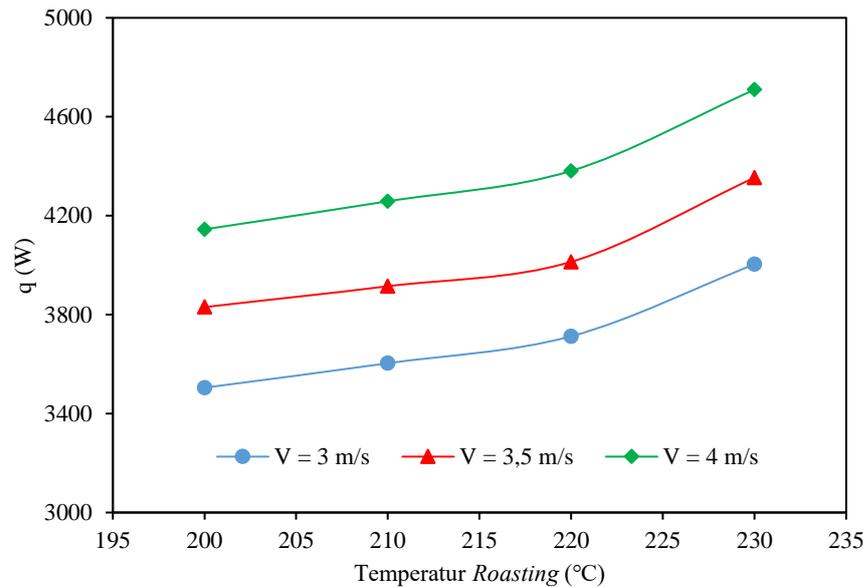
Gambar 8 merepresentasikan pengaruh temperatur *roasting* dan kecepatan aliran udara terhadap Re dan h. Pada kecepatan 3 m/s, nilai Re dengan temperatur *roasting* sebesar 200°C, 210°C, 220°C, dan 230°C berturut-turut adalah 772,6; 766,9; 763,3; dan 754,87. Re pada kecepatan udara 3,5 m/s dengan variasi temperatur *roasting* dari yang terendah sampai tertinggi adalah 898,91; 897,16; 891,60 dan 879,34. Sedangkan pada kecepatan udara 4 m/s Re yang dihasilkan adalah 1024,52; 1019,76; 1013,48 dan 1002,67 terhadap variasi temperatur *roasting* dari 200-230°C. Hasil tersebut menunjukkan semakin besar temperatur *roasting* akan menurunkan Re pada kecepatan udara yang sama, tetapi penurunannya tidak signifikan. Namun, Re akan mengalami perubahan yang besar jika kecepatan udara selama proses *roasting* semakin besar. Perbedaan tersebut dapat terlihat pada temperatur *roasting* tertinggi yaitu 230°C nilai Re dengan variasi kecepatan udara 3 m/s, 3,5 m/s dan 4 m/s sebesar 754,87; 879,34. 1002,67.

Hal ini menunjukkan bahwa kecepatan udara selama proses *roasting* berdampak besar terhadap Re yang dihasilkan. Re menentukan besarnya nilai h berdasarkan dari persamaan 1 dan 4. Pada kecepatan 3 m/s nilai h pada temperatur *roasting* sebesar 200°C, 210°C, 220°C, dan 230°C yaitu 80,24 W/m²K; 80,95 W/m²K; 81,36 W/m²K, dan 82,47 W/m²K. Pada kecepatan udara 3,5 m/s dengan variasi temperatur *roasting* dari yang terendah sampai tertinggi, h yang dihasilkan berturut-turut yaitu 86,56 W/m²K, 86,78 W/m²K, 87,38 W/m²K, dan 88,86W/m²K. Sedangkan pada kecepatan udara 4 m/s menghasilkan nilai h yaitu 92,47 W/m²K, 93,18 W/m²K, 93,55 W/m²K, dan 94,97 W/m²K terhadap variasi temperatur *roasting* dari 200-230°C. Hal tersebut menunjukkan bahwa nilai h dipengaruhi oleh temperatur *roasting* dan kecepatan udara selama *roasting* dilakukan. Semakin besar temperatur *roasting* dan kecepatan udara maka nilai h akan semakin meningkat, dalam hal ini rentang nilai h bervariasi mulai dari yang terendah sebesar 80,24 W/m²K hingga yang tertinggi yaitu 94,47 W/m²K pada proses *roasting fluid-bed roaster*. Hasil ini juga telah sesuai dengan penelitian S.A Putra, Dkk (2019) dan Clarke R.J, Dkk(2001) yang menyatakan bahwa koefisien perpindahan panas (h) pada *fluid-bed roaster* berkisar antara 40-120 W/m² K.

Laju perpindahan panas (q) dapat diketahui pengaruhnya terhadap temperatur *roasting* dan kecepatan udara berdasarkan pada **Gambar 9**. Pada kecepatan 3 m/s, nilai q dengan temperatur *roasting* sebesar 200°C, 210°C, 220°C, dan 230°C berturut-turut adalah 3504,66 W, 3603,55 W, 3712,69 W, dan 4003,60 W. Nilai q pada kecepatan udara 3,5 m/s dengan variasi temperatur *roasting* dari yang terendah sampai tertinggi adalah 3830,59 W, 3914,92 W, 4013,65 W, dan 4353,87 W. Sedangkan pada kecepatan udara 4 m/s, nilai q yang dihasilkan adalah 4144,93 W, 4258,33 W, 4381,28 W dan 4709,71 W terhadap variasi temperatur *roasting* dari 200-230°C. Laju perpindahan panas yang terbaik yaitu pada kecepatan udara 4 m/s. Selain itu, temperatur *roasting* juga dapat meningkatkan laju perpindahan panas yang terjadi selama proses *roasting*. Dengan demikian, hasil tersebut menunjukkan bahwa kecepatan udara dan temperatur *roasting* sangat berpengaruh terhadap laju perpindahan panas selama *roasting* berlangsung. Laju perpindahan panas menjadi parameter penting untuk menghasilkan kualitas *roast bean* yang diinginkan dengan waktu *roasting* yang efisien. Hal ini dikarenakan laju perpindahan panas akan menentukan hasil *roasting* biji kopi yang ingin dicapai baik pada kondisi *medium roast* maupun *dark roast*.



Gambar 8. Pengaruh temperatur *roasting* dan kecepatan aliran udara terhadap Re dan H



Gambar 9. Hubungan temperatur roasting dan laju perpindahan panas

4. KESIMPULAN

Semakin tinggi temperatur roasting yang digunakan maka laju penguapan air semakin tinggi. Namun, temperatur roasting berbanding terbalik terhadap waktu roasting yang dibutuhkan. Temperatur roasting terbaik yaitu pada 230°C yang mampu menghasilkan tingkat kematangan *medium roast* selama 16,41 menit dengan kadar air 2,6%. Sedangkan tingkat kematangan *dark roast* dihasilkan selama waktu 20,64 menit dengan kadar air biji kopi hasil roasting sebesar 1,73%. Pada proses roasting *fluid-bed roaster* menunjukkan bahwa waktu roasting selama 10 menit warna tingkat kematangan hasil roasting berada pada kondisi *light roast* pada variasi temperature roasting 200-230°C dan kecepatan udara 4 m/s. Dengan demikian, waktu roasting sebesar 10 menit tidak menunjukkan perbedaan warna tingkat kematangan roasting yang signifikan. Temperatur roasting 230°C dan kecepatan udara 4 m/s menghasilkan *roasting uniformity* pada tingkat kematangan *medium dark* dan *roast dark* 82,25% dan 81,70%. Laju perpindahan panas selama proses roasting semakin besar seiring meningkatnya kecepatan udara dan temperatur roasting. Nilai perpindahan panas tertinggi diperoleh pada variasi temperatur 230°C dengan kecepatan 4 m/s yaitu 4707,71 W dengan koefisien perpindahan adalah 94,47 W/m²K. Sedangkan nilai perpindahan panas terendah temperatur roasting 200°C dan kecepatan udara 3 m/s yaitu 3504,66 W dengan koefisien perpindahan panas sebesar 80,24 W/m²K.

DAFTAR PUSTAKA

- Alhabsy, Moh. F., Lady C., Ch. E. Lengkey., & Maya M.L. (2021). "Perbandingan Mutu Biji Kopi Robusta (*Coffea Canephora*) Hasil Pengeringan Secara Pengasapan Dan Penjemuran Di Perkebunan Kopi Desa Purworejo Kabupaten Bolaang Mongondow Timur." *Coco* 13 (3): 1–11.
- BSN. 2008. "Biji Kopi Biji Kopi (SNI 01-2907-2008)." Badan Standarisasi Nasional. Jakarta.
- Budiyanto, Damres. U., & Toto. I. (2021). "Karakteristik Fisik Kualitas Biji Kopi Dan Kualitas Kopi Bubuk Sintaro 2 Dan Sintaro 3 Dengan Berbagai Tingkat Sangrai." *Jurnal Agroindustri* 11 (1): 54–71.
- Direktorat jenderal Perkebunan. (2019). "Statistik Perkebunan Indonesia-Kopi." Indonesia.
- Eko, W., Wahyu, Gigih, A., & Heryoki, Y. (2015). "Kinerja Alsin Sangrai Kopi Tipe Fluidisasi Dan Uji Kualitas Kopi Sangrai." *Jurnal Teknologi Pertanian* 16 (2): 117–26.
- Incropera, Frank P., & David P. (2017). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer. Eighth Edition*. John Wiley & Sons, Inc.
- M. S. Dr. Ir. Sri Mulato. (2018). "Penyagraian Biji Kopi." Coffee and Cacao Training Center. 2018.
- Misto, M, N P Lestari, and E Purwandari. 2022. "Chlorogenic Acid Content of Local Robusta Coffee at Variations of Roasting Temperature." *Jurnal Pendidikan Fisika Indonesia* 18 (1): 25–32..
- Mojica, R.M., Indang, E.K. Peralta, & College Elauria, J.C. (2010). "Design, Fabrication and Performance Evaluation of a Batch-Type Coffee Roaster for Small-Scale Roasting." *Philippine Journal of Agricultural and Biosystems Engineering (Philippines)*, no. 1: 4122.
- NCA. 2023. "The NCA Complete Guide to Coffee." National Coffee Association of U.S.A., Inc. 2023.
- Paramida, Ocha, Rahmat, F., Syafriandi, & Andriani, L. (2022). "Pengujian Penyagraian Kopi Arabika Dengan Mesin Penyagrai Kopi Tabung Silinder Menggunakan Sumber Panas Listrik." *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Pertanian* 7 (4): 895–903.
- Putra, Satya, A., Umi, H., & Mirwan, A.K. (2019). "Theoretical Study of Fluidization and Heat Transfer on Fluidized Bed Coffee Roaster." *AIP Conference Proceedings* 2097.
- Rahayuningtyas, Ari, Cecep, E. A., Fitri, S., Daing, S., Arie, S., Maulana, F., Fina, N., Dede, Z.A., & Dadang. H. (2023). "Evaluation of Fluidized-Bed and Drum Roaster Performance in Roasting of Robusta Green Bean." *BIO Web of Conferences* 69.

- Raja, A.T., Rosyida, P., Supriyadi. (2018). "Pengaruh Diameter Partikel Dan Ketinggian Unggun Terhadap Fenomena Fluidisasi Yang Terjadi Pada Circulating Fluidized Bed Gasifier Menggunakan CFD." *Seminar Nasional Cendekiawan Ke 4 Tahun 2018, September 2018*: 629–34.
- Safitri, Dini, Farhan, N., Webby, S.I. (2019). "Fenomena *Coffee Shop* Di Kalangan Konsumen Remaja." *Widya Komunika* 9 (2): 137.
- Santoso, Yopi, R., Lathifa, P.A., Muhammad, S., and Gita, J.S. (2023). "Experimental Study of The Potential for Energy Absorption and Drying Time of Coffee Beans Using a Dome Dryer Type Dryer in The Sukmailang Area of Pesawaran Regency." *Journal of Renewable Energy and Mechanics* 6 (02): 108–19.
- Sary, R. (2017). "Kaji Eksperimental Pengeringan Biji Kopi Dengan Menggunakan Sistem Konveksi Paksa." *Jurnal POLIMESIN* 14 (2): 13.
- Sasongko I, and Rivai, M. (2018). "Mesin Pemanggang Biji Kopi Dengan Suhu Terkendali Menggunakan Arduino Due." *Jurnal Teknik ITS*. 7 (2): 239–44.
- Selling Coffee Online. n.d. "Coffee Roasting and Color." Sellingcoffeeonline.Com. diakses 10 Januari, (2024). www.sellingcoffeeonline.com.
- Suseno, H, N R P Galih, N Hidayati, C Alonto, and M Irfan. (2020). SNI Produk Kopi Bubuk. Perpustakaan.Bsn.Go.Id.
- Sutarsi, Elisa, R., and Iwan, T. (2016). "Penentuan Tingkat Sangrai Kopi Berdasarkan Sifat Fisik Kimia Menggunakan Mesin Penyangrai Tipe Rotari." *Prosiding Seminar Nasional APTA* 5 (1): 306–12.
- Triyanti, D.R. (2016). "Outlook Kopi Komoditas Pertanian Subsektor Perkebunan." *Pusat Data Dan Sistem Informasi Pertanian Sekretariat Jenderal*, 116.