

## Model perhitungan kompleksitas proses sangrai kopi menggunakan biji kopi tradisional Indonesia

Hendri Dwi Saptioratri Budiono<sup>a,1</sup>, Rahman Muhamad Zuhuda<sup>b</sup>,  
Mohammad Anindya Fausta<sup>b</sup>, Oka Widiantara Suputra<sup>b</sup>, Trimitra Mahesa Aditya<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Departemen Teknik Mesin, Universitas Indonesia, Jakarta

<sup>b</sup>Program Studi Teknik Mesin, Universitas Indonesia, Jakarta

<sup>1</sup>[hendri@eng.ui.ac.id](mailto:hendri@eng.ui.ac.id)

### ABSTRACT

The manufacturing process involves converting raw materials into usable products, also applicable in other sectors like coffee roasting. Coffee roasting can be considered a manufacturing process as it involves transforming green coffee beans into roasted coffee beans. Coffee roasting defines 20% - 25% of coffee quality, making a variation in process is impactful. Due to various influential parameters, achieving specific bean specifications adds complexity to the process. Indonesia, a major coffee producer, emphasizes research for enhancing coffee quality, specifically for varieties like Arabica Gayo, Arabica Solok Radjo, Robusta Bengkulu, and Robusta Temanggung. Another underlying factor for this research is the lack of studies related to the complex process of coffee roasting. This research uses the model to calculate the complexity of the manufacturing system in the coffee roasting process. This model is used as a tool to assess the existing process. Furthermore, this model simplifies the calculation of the process complexity, and the resulting index can be used to estimate initial costs during the design phase for the roasting process. This research adopts the method by W.H. El Maraghy regarding complexity modeling and applies it to the scope of coffee roasting. Based on the conducted research, the most important aspects that influence the complexity of roasting coffee beans based on the roast level are roast color, mass, and dimensions resulting from the roast profile of coffee beans. Temanggung Robusta coffee beans were found to have the highest complexity index, with an RPM of 90 and a dark roast level of 9.21.

**Keywords:** Manufacture, Indonesia coffee beans, process complexity, coffee roasting

**Received** 30 September 2023; **Presented** 5 October 2023; **Publication** 27 May 2024

### PENDAHULUAN

Saat ini, kopi dianggap sebagai salah satu minuman populer di dunia, selain air dan teh. Awal mula sejarah kopi dimulai sejak abad ke-15 [1].

Di Indonesia, kopi pertama kali dikenalkan pada abad ke-17 ketika seseorang kebangsaan Belanda membawa biji kopi arabika dari pelabuhan Mocha, Yaman ke Indonesia [2]. Titik awal perkembangan kopi dimulai saat Belanda membangun perkebunan kopi Indonesia di Pulau Jawa, tepatnya daerah Priangan, Jawa Barat. Kemudian, perkebunan kopi mulai berkembang ke seluruh Pulau Jawa dan pulau lainnya, seperti Sumatera, Sulawesi, Bali, dan Kepulauan Timor. Pengembangan kopi di Indonesia ini menimbulkan kegemaran masyarakat Indonesia terhadap kopi.

Pada tahun 2021, Indonesia berhasil mencatat angka produksi kopi sebesar 786.19 ton, membuat Indonesia menyandang status sebagai produsen kopi nomor empat di dunia [3]. Tingkat konsumsi kopi di Indonesia

menunjukkan tren yang positif dalam beberapa periode lalu. Periode 2020/2021, tercatat tingkat konsumsi kopi di Indonesia mencapai 5 juta kantong berukuran 60 kg. Angka ini merupakan hasil peningkatan sebesar 4.04 % dari periode sebelumnya [4].

Di Indonesia, setiap daerah memiliki hasil kopi produksinya masing-masing. Tercatat pada tahun 2021, terdapat 50 Indikasi Geografis Kopi Indonesia, baik yang sudah terdaftar maupun masih dalam proses [5]. Indikasi Geografis menunjukkan daerah asal yang karena faktor lingkungan geografis memberikan reputasi, kualitas, dan karakteristik tertentu pada barang dan/atau produk yang dihasilkan.

Tentu berbeda jenis biji kopi akan menghasilkan cita rasa yang berbeda-beda. Untuk mengeluarkan cita rasa dari biji kopi, tentu membutuhkan proses yang panjang. Salah satu proses yang memiliki andil adalah proses sangrai. Proses ini memiliki pengaruh terhadap mutu yang dihasilkan sebesar 20% - 25% [6].

Proses sangrai adalah proses pemanasan biji kopi hijau yang dilakukan pada suhu tinggi dan

biji kopi tersebut diputar dalam drum mesin sangrai yang telah dipanaskan. Proses ini memiliki prinsip utama untuk menyajikan biji kopi dengan cita rasa terbaik.

Seperti yang sudah dikatakan sebelumnya, proses sangrai memiliki prinsip yang sederhana, namun proses sangrai ternyata merupakan proses yang rumit. Hal ini dikarenakan proses sangrai melibatkan banyak parameter. Salah satu parameter yang dilibatkan adalah parameter yang mengendalikan panas saat proses, seperti RPM Drum, laju aliran gas bahan bakar, durasi sangrai, dsb. Dengan banyaknya parameter yang terlibat, tentu akan sulit dalam menentukan biaya proses pada tahap awal.

Penelitian ini menggunakan model kompleksitas yang diusung oleh W.H. El Maraghy [7] dalam lingkup proses sangrai kopi. Pemodelan ini akan mengkuantifikasi tingkat kerumitan dari parameter yang terdapat dalam proses sangrai kopi. Hasil kuantifikasi tersebut akan direpresentasikan dalam bentuk indeks kompleksitas. Kedepannya, pemodelan ini dan indeks yang dihasilkan dapat menjadi media untuk melakukan estimasi biaya proses pada tahap awal yang tentu sangat dibutuhkan oleh *customer*.

## METODE PENELITIAN

### 1. Alur Penelitian

Tahapan yang dilakukan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1. Berikut merupakan rangkaian dari alur penelitian yang dilakukan:

- Melakukan studi literatur terkait teori model kompleksitas W.H. El-Maraghy, kalkulasi proses kompleksitas, dan sub proses dalam sangrai kopi,
- Mengobservasi mesin sangrai SAS Coffee Roaster R001-V6 untuk menentukan parameter yang di kontrol dan divariasikan,
- Mengidentifikasi parameter non fisik dan parameter fisik dalam proses sangrai kopi,
- Mengumpulkan sampel biji kopi, mempersiapkan alat pengukuran (jangka sorong, *moisture meter*, perangkat Artisan, timbangan, *photobox*, dan kamera), dan mesin sangrai,

- Menyusun *set-up* eksperimen berupa alur pengumpulan data, pengukuran sampel, dan pencatatan hasil data,
- Mengambil dan menganalisis data untuk menentukan pembobotan dari setiap *in-process feature* ataupun *in-process specification*,
- Menghitung proses kompleksitas menggunakan parameter pembobotan yang telah didapatkan,
- Membandingkan nilai kompleksitas proses sangrai biji kopi.

### 2. Identifikasi Parameter Proses Sangrai

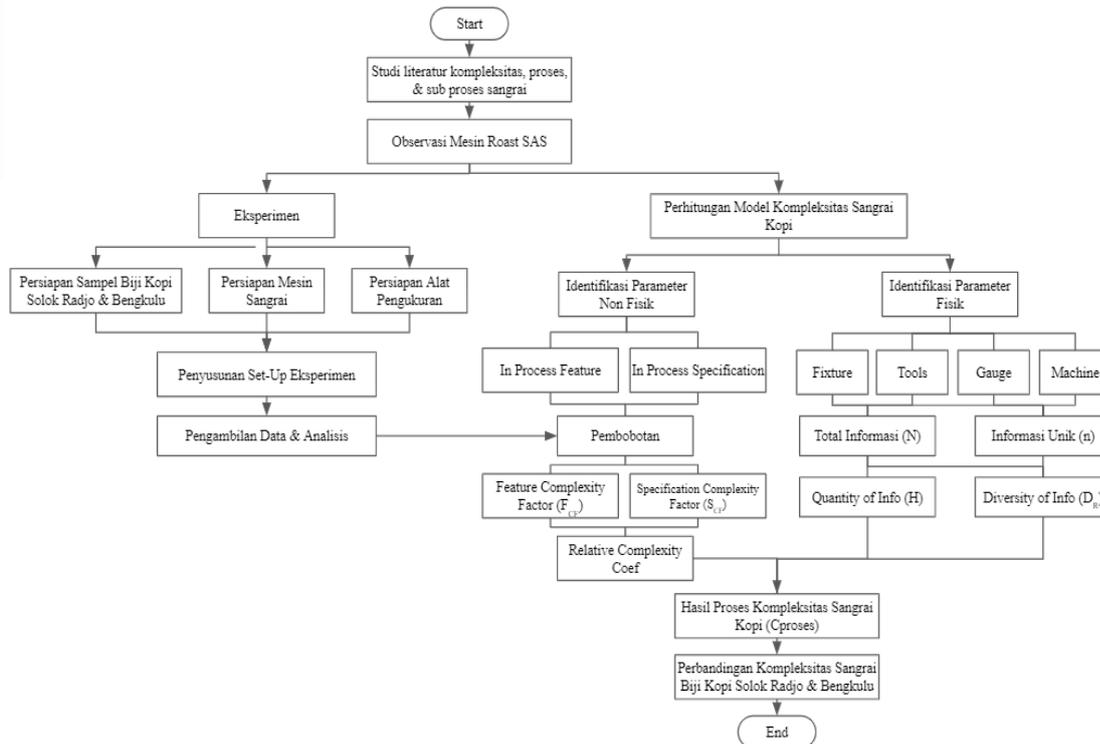
Pada proses sangrai, biji kopi akan mengalami penurunan massa. Hal ini terjadi karena pada proses penyangraian, suhu akan terus menerus naik dan akan mengubah air yang berada di dalam biji kopi menjadi uap. Dengan kata lain, air yang berada dalam biji kopi mengalami penguapan dan massa biji kopi akan mengalami penyusutan

Kemudian, biji kopi juga akan mengalami perubahan warna menjadi gelap seiring bertambahnya waktu dan semakin tinggi temperatur proses sangrai. Ini disebabkan oleh penyerapan panas oleh biji kopi dan Reaksi Maillard yang terjadi pada biji kopi. Reaksi ini adalah reaksi antara gula pereduksi dengan asam amino sehingga biji kopi mengalami pencokelatan non-enzimatik.

Selain itu, biji kopi akan mengalami penambahan volume saat proses sangrai. Hal ini terjadi akibat perubahan pada air menjadi uap saat proses pemanasan. Hal ini akan menciptakan tekanan tinggi dan mengubah dinding dari biji kopi yang sebelumnya kaku menjadi elastis. Hal ini membuat beberapa elemen dalam biji kopi keluar dan meninggalkan ruang kosong berisi gas. Maka dari itu, biji kopi akan mengembang atau mengalami pembesaran volumetrik.

### 3. Alur Eksperimen

Eksperimen berfungsi untuk mengumpulkan data untuk menentukan nilai pembobotan tabel. Eksperimen ini akan menyangrai empat biji kopi. Rancangan alur eksperimen akan dibagi ke dalam beberapa tahapan.



Gambar 1. Alur penelitian

Tahapan eksperimen dimulai dengan menyalakan mesin sangrai dan dihubungkan dengan laptop yang telah dilengkapi dengan perangkat Artisan untuk merekam data temperatur dan waktu dari proses sangrai kopi.

Setelah itu, melakukan setting awal mesin sangrai dengan menghubungkan *gas valve* dan menyalakan *burner*. Dilanjutkan dengan *pre-heating* hingga temperatur drum 160°C. Apabila temperatur *pre-heating* telah tercapai, biji kopi baru dimasukkan ke dalam drum mesin sangrai.

Untuk pengambilan sampel dilakukan dengan mengambil beberapa hasil sangrai biji kopi dan memisahkan ke dalam kontainer sampel khusus setiap 2 menit sebagai data dari eksperimen. Sampel tersebut akan diukur dimensi, massa, serta diambil gambar menggunakan kamera di dalam *photobox* untuk bisa menganalisis tingkatan sangrai biji kopi.

Terakhir, semua biji kopi disangrai hingga 16 menit setelah *charging* yang dimana sesuai hipotesis semua biji telah mengalami fase *development*.

#### 4. Alat dan Bahan

Alat yang digunakan untuk menunjang penelitian ini adalah Mesin Sangrai, yaitu SAS Roaster R001 V-6, Perangkat Lunak Artisan, Timbangan Digital, *Photobox*, Kamera Canon

EOS 550D, Jangka Sorong Digital, *Moisture Meter*, Perangkat Arduino dan Termokopel Tipe K. *Moisture Meter* digunakan sebagai alat ukur untuk melakukan dokumentasi profil kadar air dari biji kopi. Kemudian Perangkat Arduino dan Termokopel Tipe K digunakan untuk melakukan kalibrasi suhu pada Mesin Sangrai yang digunakan.

Dalam penelitian ini, bahan yang dijadikan sebagai objek penelitian adalah biji kopi tradisional Indonesia. Biji kopi yang digunakan adalah biji kopi Arabika Gayo, Arabika Solok Radjo, Robusta Bengkulu, dan Robusta Temanggung.

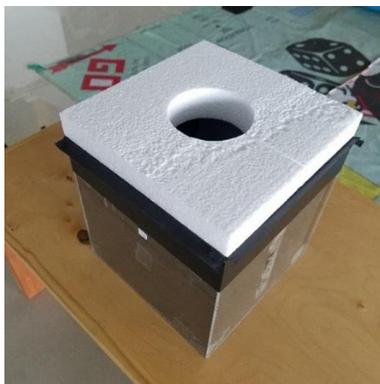
#### 5. Metode Pengukuran

##### 5.1 Pengukuran Massa

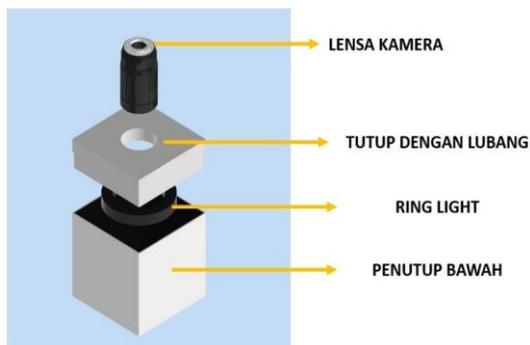
Pengukuran massa dilakukan dengan menggunakan timbangan digital yang memiliki tingkat ketelitian 0.01 gram. Pengukuran dilakukan dengan mengambil sampel biji kopi sebesar  $10 \pm 0.5$  gram. Kemudian sampel tersebut dihitung jumlah biji kopinya. Data yang diambil merupakan massa rata-rata per biji kopi kemudian data dari massa tiap sampel digunakan untuk menganalisis perubahan massa yang terjadi per 2 menit pengambilan sampel.

##### 5.2 Pengukuran Warna

Pengukuran warna dilakukan menggunakan Kamera DSLR dan *Photobox* (seperti pada Gambar 2). *Photobox* dibuat kedap cahaya serta dilengkapi dengan *ring light* yang berguna sebagai media pengambilan gambar. Kamera diatur dengan pengaturan: ISO 400, F 5.0, Standard *light settings*, Manual Focus, Manual mode, dan 1/100 shutter speed. Hal ini dilakukan agar gambar biji kopi dapat diakuisisi secara jelas. Kemudian, sampel biji kopi diletakkan di atas wadah transparan dan dimasukkan ke dalam *photobox*. Setelah itu, kamera DSLR akan berfungsi untuk mengambil gambar sampel yang berada di dalam *photobox* tersebut. Pengukuran ini dilakukan untuk melakukan identifikasi tingkat sangrai dari setiap sampel.



Gambar 2. *Photobox* yang digunakan



Gambar 3. Skema penempatan komponen pada *photobox*

### 5.3 Pengukuran Volume

Pengukuran volume dilakukan menggunakan jangka sorong yang memiliki ketelitian sebesar 0.01 mm. Kemudian sampel biji kopi akan diukur dan dicatat profil geometri. Profil yang dimaksud adalah panjang (*l*), lebar (*w*), dan ketebalan (*t*), dapat dilihat pada **Gambar X**. Proses pengukuran akan diulang untuk 20 sampel biji kopi. Hasil dari pengukuran 20 sampel biji kopi akan diambil rata-rata hasil pengukuran. Kemudian, pengukuran volume dilakukan menggunakan Persamaan 1 [8]:

$$V = \frac{\pi}{6} lwt \quad (1)$$

Dimana,

*V* : Volume biji kopi (mm<sup>3</sup>)

*l* : Panjang biji kopi (mm)

*w* : Lebar biji kopi (mm)

*t* : Ketebalan biji kopi (mm)

### 5.4 Identifikasi Parameter Kompleksitas

Terdapat dua parameter utama untuk melakukan perhitungan indeks kompleksitas, yaitu:

#### 5.4 Parameter Fisik

Parameter fisik merupakan parameter yang berasal dari komponen fisik produk atau peralatan yang digunakan. Terdapat empat jenis parameter, yaitu:

- *Fixture*, atau komponen yang berfungsi menjaga posisi objek agar tetap dalam keadaan statis,
- *Tools*, atau komponen yang berfungsi dalam membantu proses,
- *Gauge*, atau komponen yang berfungsi untuk mengukur sebuah objek, dan
- *Machine*, atau peralatan/mesin yang digunakan.

#### 5.5 Parameter Non-Fisik

Terdapat dua jenis parameter non fisik, yaitu:

- *In-process feature*, atau parameter yang ditambahkan ke dalam proses untuk membentuk produk sesuai standar, dan
- *In-process specification*, atau parameter yang ditambahkan ke dalam proses untuk melebihi standar dan menambahkan kualitas.

### 5.6 Persamaan Kompleksitas Proses Sangrai Kopi

$$C_{proses\ sangrai} = (D_{R_{proses,x}} + c_{proses,x}) * H_{proses,x} \quad (2)$$

$$D_{R_{proses,x}} = \frac{n}{N} \quad (3)$$

$$H_{proses,x} = \log_2(N + 1) \quad (4)$$

$$c_{proses,x} = \sum_{f=1}^F (X_f * c_{f,feature}) \quad (5)$$

$$c_{f,feature} = \frac{F_N * F_{CF} + S_N * S_{CF}}{F_N + S_N} \quad (6)$$

$$F_{CF} = \frac{\sum_{j=1}^J factor\ level_j}{J} \quad (7)$$

$$S_{CF} = \frac{\sum_{k=1}^K \text{factor level}_k}{K} \quad (8)$$

Tabel 1. Variabel pada persamaan 2-8

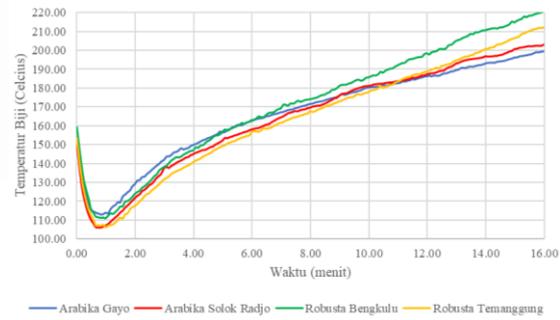
$C_{proses\ sangrai}$	: Indeks kompleksitas proses sangrai kopi
$D_{R_{pr,x}}$	: Variasi rasio dari lingkungan penunjang proses sangrai kopi
$C_{pr,x}$	: Koefisien relatif kompleksitas proses sangrai kopi, yang dilihat berdasarkan upaya perbaikan fitur produk kembali ke keadaan semula
$H_{pr,x}$	: Jumlah informasi dari lingkungan penunjang proses sangrai kopi
$n$	: Variasi informasi
$N$	: Jumlah informasi
$x_f$	: Presentasi sub-proses sangrai, pada fitur tertentu, dari keseluruhan proses sangrai yang dijalani produk tersebut
$C_{f,feature}$	: Faktor upaya untuk sangrai, yang dilihat dari hasil pembobotan elemen <i>in-process feature</i> dan <i>in-process specification</i>
$F_N$	: Jumlah dari nilai pembobotan upaya dalam mencapai target utama dari sangrai ( <i>in-process feature</i> )
$F_{CF}$	: Rasio jumlah proses sangrai terhadap target utama yang hendak dicapai
$S_N$	: jumlah dari nilai pembobotan upaya dalam mencapai target tambahan dari proses sangrai ( <i>in-process specification</i> )
$S_{CF}$	: Rasio jumlah proses perbaikan terhadap target tambahan yang hendak dicapai
$J$	: Aspek <i>in-process feature</i> (target utama dari proses sangrai kopi)
$K$	: Aspek <i>in-process specification</i> (target tambahan dari proses sangrai kopi)
$factor\ level_j$	: variasi aspek <i>feature</i>
$factor\ level_k$	: variasi aspek <i>specification</i>

## HASIL DAN PEMBAHASAN

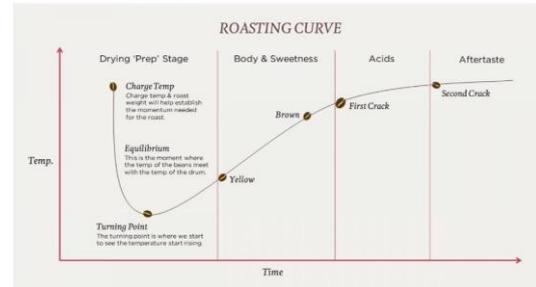
### 1. Hasil dan Analisis Profil Sangrai

Berdasarkan eksperimen yang dilaksanakan, hasil dari kurva sangrai keempat biji kopi dapat dilihat pada Gambar 4. Untuk melihat kesesuaian dengan kurva hasil sangrai secara umum, seperti pada Gambar 5.

Kesesuaian pertama ada pada fase turning point, dimana pada fase ini terjadi penurunan temperatur ketika dilakukan tahapan charging atau proses masuknya biji kopi ke dalam mesin sangrai. Selain itu, kemiripan terduga terlihat setelah proses drying selesai. Pada fase ini, akan terjadi peningkatan temperatur secara terus menerus seiring waktu hingga mencapai titik akhir temperatur. Oleh karena itu, dapat dikatakan eksperimen pada penelitian ini valid untuk dianalisis lebih lanjut mengenai data pengukuran dan pemodelan kompleksitas proses sangrai kopi.



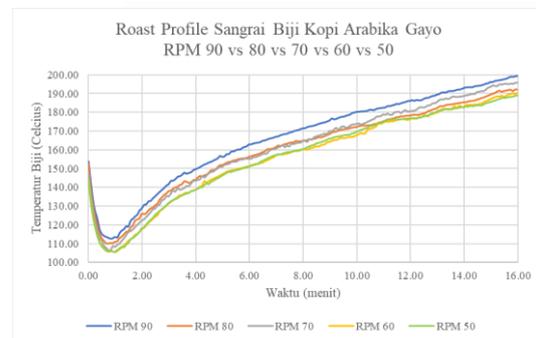
Gambar 4. Hasil profil sangrai empat biji kopi pada RPM 90



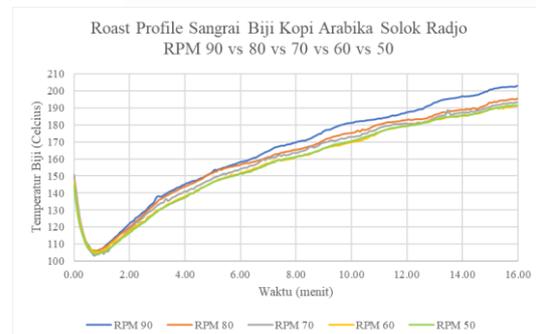
Gambar 5. Kurva profil sangrai secara umum [9]

### 2. Hasil dan Analisis Pengaruh RPM

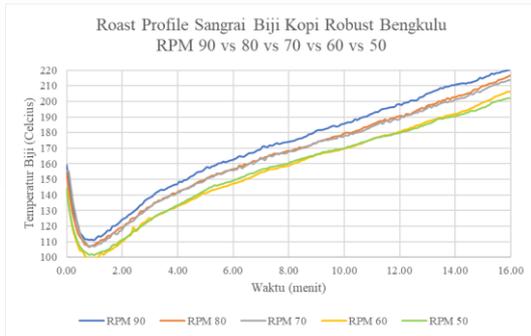
Pada penelitian ini, RPM divariasikan untuk menelusuri pengaruh RPM terhadap profil sangrai biji kopi. Pada penelitian ini, penulis mengambil contoh perbandingan setiap variasi RPM pada sangrai biji kopi berikut:



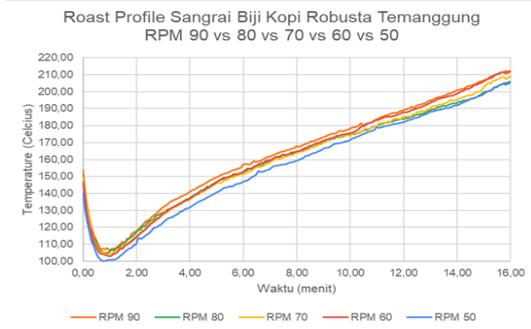
Gambar 6. Perbandingan profil sangrai biji kopi arabika gayo RPM 90, 80, 70, 60, 50



Gambar 7. Perbandingan profil sangrai biji kopi arabika solok radjo RPM 90, 80, 70, 60, 50



Gambar 8. Perbandingan profil sangrai biji kopi robusta bengkulu RPM 90, 80, 70, 60, 50



Gambar 9. Perbandingan profil sangrai biji kopi robusta temanggung RPM 90, 80, 70, 60, 50

Terlihat dengan adanya penurunan nilai RPM drum pada mesin sangrai, maka profil sangrai akan memiliki *tipping point* temperatur yang lebih rendah serta titik akhir temperatur biji memiliki nilai yang semakin kecil. Fenomena ini merupakan hasil dari pengaruh RPM drum yang menentukan seberapa banyak biji yang mengalami kontak dengan drum dan juga waktu jatuh biji kopi ketika drum berputar [10], mengakibatkan waktu kontak dari biji kopi saat disangrai akan lebih lama di salah satu sisi permukaan drum ketika nilai RPM menurun sehingga akan terjadi perlambatan pada pemerataan perpindahan kalor dari drum ke biji kopi. Hal ini terbukti pada Gambar 6-10 untuk keempat biji kopi.

### 3. Pemodelan Proses Kompleksitas

#### 3.1 Parameter Fisik

Untuk proses sangrai kopi, parameter fisik adalah parameter yang berasal dari komponen fisik produk atau peralatan dari mesin sangrai

- *Setting*, yaitu proses mengatur *controls* dan *gauge* saat mesin sangrai dinyalakan. *Setting* yang dilakukan adalah *gas pressure*, *airflow speed*, *fan exhaust*, dan RPM Drum,

yang digunakan dalam menghasilkan biji kopi sangrai sebagai produk.



Gambar 10. Komponen Mesin SAS [11]

Berdasarkan observasi secara langsung pada mesin sangrai serta studi literatur menggunakan buku panduan mesin Roaster SAS, didapat parameter fisik yang mendukung keseluruhan proses sangrai kopi. Kemudian berdasarkan identifikasi parameter fisik, didapatkan nilai H dan  $D_r$  yang dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Parameter fisik proses sangrai kopi

Tipe	Deskripsi	Total Info (N)	Distinct Info (n)
Gauge	Gas Manometer	2	1
	Digital Thermocouple	2	2
	Power Cord Data Monitor and Log (Artisan)	1	1
	Sample Spoon (Sampler)	1	1
	Lamp	1	1
	Roasting Check Window	1	1
Controls	Fire Check Window	1	1
	Control Panel Dial	4	4
	Control Panel Button	4	4
Tools	Emergency Switch	1	1
	Inlet Pipe (From Gas)	1	1
	Gas Valve	2	2
	Gas Tube	1	1
	Hopper Gate	1	1
	Bean Outlet	1	1
	Discharge Gate	1	1
	Mixer	1	1
	Blower	1	1
	Cyclone	2	2
	Chaff Collector	2	2
	Cump Collector	1	1
Fixture	Hopper	1	1
	Drum	1	1
	Cooling Tray	1	1
<b>Total</b>		<b>35</b>	<b>34</b>
<b>H</b>		<b>5.17</b>	
<b><math>D_r</math></b>		<b>0.97</b>	

#### 3. Parameter Non Fisik

Parameter ini diidentifikasi dengan menentukan tahapan sub proses yang ada. Setelah melakukan studi literatur dan observasi langsung, sub proses pada proses sangrai adalah sebagai berikut.

- *Pre-heating*, yaitu proses pemanasan drum mesin sangrai agar dapat digunakan untuk menyangrai biji kopi dengan efektif.
- *Charging*, yaitu proses biji kopi dimasukkan ke dalam drum mesin sangrai. Kapasitas biji yang dimasukkan sesuai

dengan kapasitas mesin dan tujuan produksi.

- *Heating*, yaitu proses biji kopi mulai dimasak. Proses ini didasarkan pada tingkatan kualitas sangrai yang dituju sehingga temperatur dan durasi sangrai merupakan parameter yang penting.
- *Cooling*, yaitu proses masaknya biji kopi dihentikan sehingga tidak terjadi perubahan aroma dan mutu setelah disangrai.

Berdasarkan sub proses tersebut, *in-process feature* dan *in-process specification* dapat diidentifikasi seperti pada Tabel 3.

Tabel 3. Parameter non fisik proses sangrai kopi

Sub Proses	Aktivitas	In-Process Feature	In-Process Specification
Setting	Menyalakan Mesin		
	Mengatur Gas		
	Menyalakan dan mengatur <i>automatic burner</i>		
	Menyalakan dan mengatur RPM		
	Menyalakan dan mengatur <i>airflow speed</i>		
Pre-Heating	Monitoring waktu dan temperatur drum pre-heating		
Charging	Memasukkan biji kopi ke dalam mesin		
Heating	Monitoring waktu dan temperatur drum pre-heating	Roast Level (Warna, Massa, dan Geometri)	
Cooling	Membuka <i>bean outlet</i>		
	Menyalakan <i>mixer</i>		
	Menyalakan <i>cooling</i>		
	Monitoring waktu <i>cooling</i>		

### a. Hasil Pengukuran

Tabel 5 adalah hasil pengambilan data yang dilakukan pada eksperimen. Pada Tabel 5, terdapat perubahan massa, warna, dan volume pada proses sangrai seiring bertambahnya waktu.

Sesuai dengan hasil literatur dan eksperimen yang telah dilakukan, hasil dari pengukuran massa menunjukkan bahwa biji kopi yang sudah disangrai mengalami penurunan massa. Kemudian biji kopi juga mengalami perubahan warna menjadi gelap seiring bertambahnya waktu dan semakin tinggi temperatur proses

sangrai. Selain itu, volume dari biji kopi akan mengalami ekspansi setelah melalui tahapan sangrai.

### b. Pembobotan

Setelah ditentukan parameter non fisik dan mengambil data pengukuran, dilakukan pembobotan untuk menghitung nilai kompleksitas relatif ( $C_{pr,x}$ ). Pembobotan dilakukan dengan konsep berikut: [12]

#### i. Pembobotan Massa

Pembobotan massa dilakukan berdasarkan perbandingan penurunan massa setiap sampel. Penurunan massa dibandingkan dengan sampel menit ke 2 karena sampel pada menit ke 2 adalah sampel pertama yang diobservasi dalam interval waktu penyangraian kopi. Nilai pembobotan juga dilakukan normalisasi logaritma sesuai dengan nilai maksimum dan nilai minimum. Hal ini dilakukan karena persebaran data yang tidak konsisten dan tidak linear. Oleh karena itu, dapat diidentifikasi nilai minimum dan maksimum dari perbandingan penurunan massa pada Tabel 4.

Tabel 4. Maksimum dan minimum perbandingan penurunan massa biji kopi

Perbandingan Penurunan Massa	
Nilai Maksimum	0,64
Nilai Minimum	1,00

#### ii. Pembobotan Warna

Pembobotan warna dilakukan berdasarkan kemiripan tingkat sangrai terhadap standar SCA yang dihasilkan oleh setiap sampel dalam interval 2 sampai dengan 16 yang mengikuti lamanya waktu sangrai. Pada pembobotan ini, normalisasi dilakukan hanya nilai minimum dan maksimum. Hal ini dilakukan karena pergerakan nilai waktu sangrai linear dan perubahannya konstan. Oleh karena itu, dilakukan pengembangan pembobotan dari hasil identifikasi warna tingkatan sangrai seperti pada Tabel 6.

Tabel 5. Hasil pengukuran

		Durasi Sangrai							
		2 Menit	4 Menit	6 Menit	8 Menit	10 Menit	12 Menit	14 Menit	16 Menit
G-90	Volume (mm <sup>3</sup> )	0,20	0,19	0,19	0,16	0,16	0,16	0,16	0,15
	Tingkat Sangrai	Light	Light	Light	Light	Medium	Medium	Medium	Dark
	Massa (gram)	146,76	176,54	188,46	226,40	232,66	280,04	289,58	328,24
G-80	Volume (mm <sup>3</sup> )	0,22	0,18	0,18	0,18	0,17	0,17	0,17	0,16
	Tingkat Sangrai	Light	Light	Light	Light	Medium	Medium	Medium	Dark
	Massa (gram)	143,05	158,43	162,22	226,85	250,17	274,32	286,73	293,83
G-70	Volume (mm <sup>3</sup> )	0,19	0,19	0,17	0,17	0,15	0,15	0,15	0,15
	Tingkat Sangrai	Light	Light	Light	Light	Light	Medium	Medium	Medium
	Massa (gram)	146,73	159,99	195,22	181,66	183,36	216,53	253,27	341,14
G-60	Volume (mm <sup>3</sup> )	0,20	0,20	0,19	0,19	0,19	0,17	0,17	0,16
	Tingkat Sangrai	Light	Light	Light	Light	Light	Medium	Medium	Medium
	Massa (gram)	163,62	164,08	170,66	178,93	241,15	273,80	281,14	282,96
G-50	Volume (mm <sup>3</sup> )	0,20	0,19	0,19	0,19	0,17	0,17	0,16	0,15
	Tingkat Sangrai	Light	Light	Light	Light	Light	Medium	Medium	Medium
	Massa (gram)	159,74	163,62	164,99	179,73	194,34	239,37	305,93	368,99
S-90	Volume (mm <sup>3</sup> )	0,16	0,15	0,15	0,14	0,13	0,13	0,13	0,13
	Tingkat Sangrai	Light	Light	Light	Light	Light	Light	Medium	Dark
	Massa (gram)	166,58	178,06	178,45	191,16	220,71	239,72	241,92	269,98
S-80	Volume (mm <sup>3</sup> )	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,13	0,13
	Tingkat Sangrai	Light	Light	Light	Light	Light	Light	Light	Medium
	Massa (gram)	130,23	186,54	223,84	227,13	229,75	238,10	241,05	261,24
S-70	Volume (mm <sup>3</sup> )	0,15	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,12
	Tingkat Sangrai	Light	Light	Light	Light	Light	Light	Light	Medium
	Massa (gram)	116,04	118,63	141,52	178,37	181,35	188,97	204,20	267,00
S-60	Volume (mm <sup>3</sup> )	0,16	0,16	0,15	0,15	0,14	0,14	0,14	0,13
	Tingkat Sangrai	Light	Light	Light	Light	Light	Light	Light	Medium
	Massa (gram)	129,70	137,76	192,92	198,10	248,64	248,73	261,39	308,08
S-50	Volume (mm <sup>3</sup> )	0,16	0,15	0,15	0,14	0,14	0,14	0,13	0,13
	Tingkat Sangrai	Light	Light	Light	Light	Light	Light	Light	Medium
	Massa (gram)	129,80	169,43	174,68	199,43	212,32	235,19	240,04	290,66
B-90	Volume (mm <sup>3</sup> )	0,25	0,23	0,23	0,23	0,23	0,20	0,21	0,16
	Tingkat Sangrai	Light	Light	Light	Light	Light	Light	Medium	Dark
	Massa (gram)	177,22	259,17	305,59	338,29	402,02	454,14	530,49	535,60
B-80	Volume (mm <sup>3</sup> )	0,27	0,24	0,23	0,23	0,23	0,22	0,21	0,20
	Tingkat Sangrai	Light	Light	Light	Light	Light	Light	Medium	Dark
	Massa (gram)	157,35	313,58	292,68	316,36	375,70	379,61	382,32	591,76
B-70	Volume (mm <sup>3</sup> )	0,26	0,25	0,24	0,24	0,23	0,21	0,21	0,21
	Tingkat Sangrai	Light	Light	Light	Light	Light	Light	Light	Medium
	Massa (gram)	176,36	220,84	297,59	305,87	353,79	365,98	363,41	432,41
B-60	Volume (mm <sup>3</sup> )	0,26	0,24	0,23	0,23	0,23	0,22	0,22	0,21
	Tingkat Sangrai	Light	Light	Light	Light	Light	Light	Light	Medium
	Massa (gram)	165,37	212,43	303,88	346,08	347,77	358,51	429,98	482,17
B-50	Volume (mm <sup>3</sup> )	0,26	0,26	0,24	0,23	0,23	0,23	0,21	0,20
	Tingkat Sangrai	Light	Light	Light	Light	Light	Light	Light	Medium
	Massa (gram)	164,11	243,60	251,97	264,89	331,64	424,74	504,23	519,25
T-90	Volume (mm <sup>3</sup> )	0,26	0,24	0,24	0,24	0,22	0,22	0,20	0,19
	Tingkat Sangrai	Light	Light	Light	Light	Light	Medium	Medium	Dark
	Massa (gram)	215,45	216,58	219,63	303,41	341,43	421,92	545,73	569,28
T-80	Volume (mm <sup>3</sup> )	0,25	0,24	0,24	0,23	0,23	0,22	0,22	0,22
	Tingkat Sangrai	Light	Light	Light	Light	Light	Light	Medium	Dark
	Massa (gram)	176,64	196,88	291,37	303,84	409,78	464,15	470,57	498,65
T-70	Volume (mm <sup>3</sup> )	0,26	0,25	0,25	0,23	0,23	0,22	0,21	0,21
	Tingkat Sangrai	Light	Light	Light	Light	Light	Light	Medium	Dark
	Massa (gram)	222,80	286,18	291,05	319,25	356,56	419,72	525,98	666,00
T-60	Volume (mm <sup>3</sup> )	0,25	0,25	0,24	0,23	0,23	0,22	0,21	0,20
	Tingkat Sangrai	Light	Light	Light	Light	Light	Light	Medium	Dark
	Massa (gram)	167,36	247,45	257,88	339,36	369,15	381,82	390,69	463,57
T-50	Volume (mm <sup>3</sup> )	0,26	0,24	0,23	0,23	0,23	0,23	0,21	0,21
	Tingkat Sangrai	Light	Light	Light	Light	Light	Light	Medium	Dark
	Massa (gram)	173,80	288,60	323,09	323,09	335,79	363,38	367,19	434,33

Jenis Biji Kopi dengan Variasi RPM

Tabel 6. Pembobotan warna berdasarkan durasi sangrai

Pembobotan Warna Berdasarkan Durasi Sangrai							
0,00	0,14	0,29	0,43	0,57	0,71	0,86	1
2 Menit	4 Menit	6 Menit	8 Menit	10 Menit	12 Menit	14 Menit	16 Menit

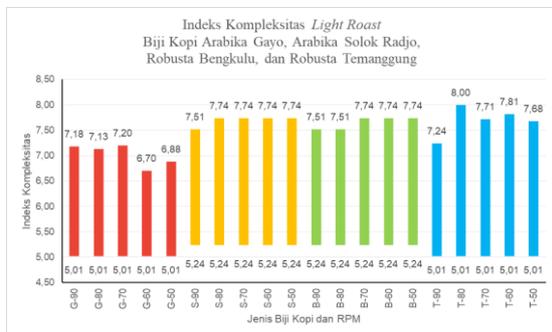
### iii. Pembobotan Volume

Pembobotan volume dilakukan berdasarkan perbandingan peningkatan volume setiap sampel. Peningkatan volume dibandingkan dengan sampel menit ke 2 karena sampel pada menit ke 2 adalah sampel pertama yang diobservasi dalam interval waktu penyangraian kopi. Nilai pembobotan juga dilakukan normalisasi logaritma sesuai dengan nilai maksimum dan nilai minimum. Hal ini dilakukan karena persebaran data yang tidak konsisten dan tidak linear. Oleh karena itu, dapat diidentifikasi nilai minimum dan maksimum dari perbandingan peningkatan volume pada Tabel 7.

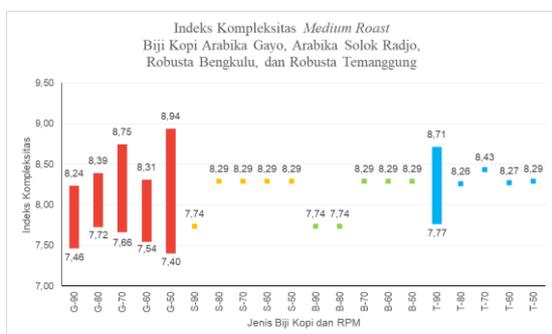
Tabel 7. Maksimum dan Minimum Perbandingan Ekspansi Volume Biji Kopi

Perbandingan Ekspansi Volume	
Nilai Maksimum	3,76
Nilai Minimum	1,00

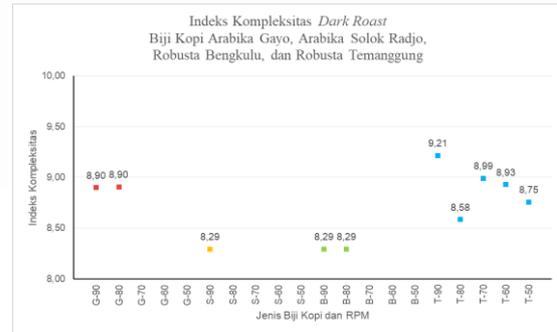
### c. Hasil Kalkulasi Indeks Kompleksitas



Gambar 11. Indeks kompleksitas proses sangrai kopi dengan tingkat sangrai *light*



Gambar 12. Indeks kompleksitas proses sangrai kopi dengan tingkat sangrai *medium*



Gambar 13. Indeks kompleksitas proses sangrai kopi dengan tingkat sangrai *dark*

Untuk tingkat sangrai *light*, semua sampel berhasil mencapai titik tersebut. Untuk indeks kompleksitas yang dihasilkan juga berada pada rentang. Hal ini dikarenakan tingkat sangrai tersebut dapat dicapai pada rentang durasi yang Panjang, tidak hanya pada satu durasi tertentu.

Walaupun semua sampel berhasil mencapai tingkat sangrai medium, namun tidak semua sampel sampai ke tingkat sangrai pada beberapa rentang durasi. Seperti pada biji kopi Arabika Solok Radjo dengan RPM 90 yang berhasil mencapai tingkat sangrai medium hanya pada menit ke 14. Berbeda dengan biji kopi Arabika Gayo dengan RPM 90 yang berhasil mencapai tingkat sangrai medium pada menit ke 10, 12, dan 14.

Untuk tingkat sangrai terakhir, yaitu *Dark Roast*, tidak semua sampel dari variasi RPM mencapai tingkatan sangrai ini. Hal ini dapat terjadi karena pada penelitian ini, durasi sangrai dibatasi hanya 16 menit saja. Seperti pada biji kopi Robusta Temanggung dengan RPM 50 yang mencapai tingkat sangrai *dark* di menit ke 16, tidak seperti biji kopi Robusta Bengkulu yang dengan durasi 16 menit hanya mencapai tingkat sangrai *medium* saja.

Dari hasil penelitian, semua sampel dengan RPM 90 berhasil mencapai tingkat sangrai terakhir, yaitu *Dark Roast*. Hal ini dikarenakan biji kopi dengan tingkat kematangan yang lebih tinggi terjadi pada proses sangrai dengan RPM lebih tinggi.

### d. Pembaharuan Penelitian Sebelum

Penelitian ini menyatukan beberapa metode yang telah dilakukan oleh penelitian sebelumnya. W.H. El Maraghy dan R. J. Urbanic melakukan penilaian kompleksitas operasional menggunakan pemodelan kompleksitas [13]. S.N. Samy dan H. El Maraghy berhasil dalam melakukan pengembangan pemodelan

kompleksitas dan kemudian diaplikasikan dalam mengukur kompleksitas perakitan produk [14].

Selain itu, penelitian sebelumnya terkait aplikasi pemodelan kompleksitas juga telah dilakukan pada beberapa sektor. Pada sektor permesinan, terdapat penelitian yang berhasil mengaplikasikan pemodelan kompleksitas untuk menentukan tingkat kerumitan dari produk hasil yang melalui proses permesinan [15]. Kemudian pada proses *casting*, aplikasi pemodelan kompleksitas digunakan untuk melakukan evaluasi desain pada proses *Low Pressure Die Cast* (LPDC) [16]. Penelitian ini mengaplikasikan pemodelan kompleksitas untuk sektor F&B, khususnya untuk proses sangrai kopi.

Untuk industri F&B, terdapat penelitian yang dilakukan sebelumnya terkait pengembangan model kompleksitas untuk sangrai kopi [12]. Pada penelitian ini, dilakukan peningkatan dengan menambah jenis biji kopi menjadi 4 biji kopi. Oleh karena itu, indeks yang dihasilkan dapat lebih akurat dan bisa menjadi *database* untuk penelitian lebih lanjut setelahnya.

## KESIMPULAN

Pada proses sangrai, subproses yang paling mempengaruhi perbedaan nilai kompleksitas proses sangrai biji kopi yaitu proses *heating*. Hal ini dikarenakan adanya perbedaan durasi yang mempengaruhi tingkatan sangrai biji kopi.

Aspek penting lain yang mempengaruhi kompleksitas sangrai biji kopi berdasarkan tingkatan sangrai adalah massa, warna sangrai, dan dimensi yang dihasilkan dari profil sangrai biji kopi.

Variasi dari RPM drum mesin sangrai hanya akan memengaruhi temperatur *turning point* dan titik akhir temperatur biji dari biji kopi. Berdasarkan penelitian ini, RPM tidak memiliki pengaruh yang besar dalam pembentukan indeks kompleksitas. Kenaikan RPM hanya akan mempercepat proses sangrai kopi untuk mencapai tingkatan sangrai *dark* karena suhu akan naik dengan lebih cepat.

Indeks kompleksitas yang didapatkan berdasarkan hasil penelitian untuk biji kopi Arabika Gayo dengan RPM 90 untuk tingkat sangrai *light* adalah 5.01-7.18, tingkat sangrai *medium* adalah 7.46-8.24, dan tingkat sangrai *dark* 8.90; kemudian dengan RPM 80 untuk tingkat sangrai *light* adalah 5.01-7.13, tingkat sangrai *medium* adalah 7.72-8.39, dan tingkat

sangrai *dark* adalah 8.90; kemudian dengan RPM 70 untuk tingkat sangrai *light* adalah 5.01-7.20 dan tingkat sangrai *medium* adalah 7.66-8.75; kemudian dengan RPM 60 untuk tingkatan sangrai *light* adalah 5.01-6.70 dan tingkat sangrai *medium* adalah 7.54-8.31; kemudian pada RPM 50 dengan tingkatan sangrai *light* adalah 5.01-6.88 dan tingkatan sangrai *medium* adalah 7.40-8.94.

Untuk biji kopi Arabika Solok Radjo, indeks kompleksitas yang didapatkan berdasarkan hasil penelitian dengan RPM 90 untuk tingkat sangrai *light* adalah 5.24-7.51, tingkat sangrai *medium* adalah 7.74, dan tingkat sangrai *dark* 8.29; kemudian dengan RPM 80, 70, 60, dan 50 didapatkan indeks kompleksitas yang sama. Untuk tingkat sangrai *light* adalah 5.24-7.74 dan untuk tingkat sangrai *medium* adalah 8.29.

Kemudian, untuk biji kopi Robusta Bengkulu, dengan RPM 90 dan 80, indeks kompleksitas untuk tingkat sangrai *light* adalah 5.24-7.51, untuk tingkat sangrai *medium* adalah 7.74, dan untuk tingkat sangrai *dark* adalah 8.29. Dengan RPM 70, 60, dan 50, indeks kompleksitas yang didapat untuk tingkat sangrai *light* adalah 5.24-7.74 dan untuk tingkat sangrai *medium* adalah 8.29.

Untuk biji kopi Robusta Temanggung, didapatkan indeks kompleksitas pada RPM 90 untuk tingkat sangrai *light* adalah 5.01-7.24, untuk tingkat sangrai *medium* adalah 7.77-8.71, dan untuk tingkat sangrai *dark* adalah 9.21. Pada RPM 80 untuk tingkat sangrai *light* adalah 5.01-8.00, untuk tingkat sangrai *medium* adalah 8.26, dan untuk tingkat sangrai *dark* adalah 8.58. Pada RPM 70, tingkat sangrai *light* indeks kompleksitasnya adalah 5.01-7.71, untuk tingkat sangrai *medium* adalah 8.43, dan untuk tingkat sangrai *dark* adalah 8.99. Pada RPM 60, didapatkan indeks kompleksitas untuk tingkat sangrai *light* sebesar 5.01-7.81, untuk tingkat sangrai *medium* sebesar 8.27, dan untuk tingkat sangrai *dark* sebesar 8.93. Pada RPM 50, untuk tingkat sangrai *light* adalah 5.01-7.68, untuk tingkat sangrai *medium* adalah 8.29, dan untuk tingkat sangrai *dark* adalah 8.75.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Universitas Indonesia atas dukungannya dalam melakukan penelitian ini sehingga dapat diselesaikan dengan baik.

## DAFTAR PUSTAKA

[1] Myhrvold, N. (2022). Coffee | beverage |

- Britannica. In Encyclopædia Britannica. <https://www.britannica.com/topic/coffee>.
- [2] Kemepenrin. (2017). Peluang Usaha IKM Kopi (pp. 6–11). Kemepenrin. <https://kemenperin.go.id/download/17797/Peluang-Usaha-Industri-Kecil-Menengah-Kopi>.
- [3] Badan Pusat Statistik Indonesia. (2021). Statistik Kopi Indonesia 2021. Jakarta: Badan Pusat Statistik Indonesia.
- [4] International Coffee Organization (2021). *World Coffee Consumption*.
- [5] Kemenparekraf. (2021). Indikasi Geografis Kopi Indonesia – Zona Integritas. PemasaraneKraf.kemenparekraf.go.id. <https://pemasaraneKraf.kemenparekraf.go.id/indikasi-geografis-kopi-indonesia/>.
- [6] Badan Standardisasi Nasional. (2020, August 15). Diskusi dan Sharing SNI Biji Kopi. [https://binaumk.bsn.go.id/uploads/materi/master\\_file/c0f626e0ab83bbfbb0eaae8c7c5fe0d4.pdf](https://binaumk.bsn.go.id/uploads/materi/master_file/c0f626e0ab83bbfbb0eaae8c7c5fe0d4.pdf).
- [7] El Maraghy, W. H., & Urbanic, R. J. (2003). *Modelling of Manufacturing Systems Complexity*. CIRP Annals, 52(1), 363–366. [https://doi.org/10.1016/s0007-8506\(07\)60602-7](https://doi.org/10.1016/s0007-8506(07)60602-7).
- [8] Hidayat, D. D., Indriati, A., Andriansyah, C. E., Rahayuningtyas, A., & Sudaryanto, A. (2020). *Changes Of Some Engineering Properties of Coffee Beans Due to Roasting Process*. Asian Journal of Applied Sciences, 12-21.
- [9] Lincoln & York. (2019). How Are Coffee Beans Roasted? | Roasting Coffee | Lincoln & York. [www.lincolnandyork.com](http://www.lincolnandyork.com). <https://www.lincolnandyork.com/blog/how-are-coffee-beans-roasted>.
- [11] PT. SAS Coffee Roaster. (n.d.). *Buku Panduan Mesin Roaster SAS*.
- [12] Budiono, H. D. S., Fausta, M. A., Suputra, O. W., Aditya, T. M., Zuhuda, R. M. (2022). *Pengembangan Model Perhitungan Kompleksitas Proses Sangrai Kopi Indonesia Menuju Sistem Otomatisasi*. Jurnal Teknik Mesin Indonesia, 18(1), 1-10.
- [13] El-Maraghy, W.H. (2006). *Assessment of Manufacturing Operational Complexity*. University of Windsor, Windsor, Ontario, Canada.
- [14] Samy, S.N., ElMaraghy, H. (2010). *A model for measuring products assembly complexity*. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 1015-1027.
- [15] Budiono, H. D. S., Wicaksono, R., Kiswanto, G. (2012). *Perbandingan Metode Pembobotan dalam Perhitungan Nilai Kompleksitas Dies Panel Roof dan Pengaruhnya Terhadap Tingkat Perubahan Disain*. In Prosiding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) XI, Yogyakarta (pp. 16-17).
- [16] Budiono, H. D. S., Nurdian, D., Indianto, M. A., Nugroho, H. S. (2022). *Development of a process complexity index of low pressure die casting for early product design evaluation*. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6 (1 (120)), 101–108. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.264984>.