

Pengembangan model perhitungan kompleksitas proses sangrai kopi Indonesia menuju sistem otomatisasi

Hendri Dwi Saptioratri Budiono¹, Mohammad Anindya Fausta¹, Oka Widiantra Suputra¹, Trimitra Mahesa Aditya¹, Rahman Muhamad Zuhuda²

¹Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia
Kampus Baru UI, Depok, 16424

²Fakultas Teknik, Universitas Indonesia
Kampus Baru UI, Depok, 16424

Email korespondensi: hendri@eng.ui.ac.id

Abstrak

Proses menyangrai kopi untuk memperoleh mutu produk biji kopi yang konsisten dan sesuai dengan preferensi pasar terbilang cukup kompleks dan membutuhkan keahlian operator yang memiliki pengalaman bertahun-tahun. Kajian ini bertujuan untuk menghadirkan pemodelan perhitungan kompleksitas sistem manufaktur proses sangrai kopi sebagai salah satu jenis alat ukur sebuah proses untuk menilai proses yang ada serta mengestimasi biaya awal di tahapan desain sebelum meningkat pada proses otomatisasi proses sangrai. Peneliti mengadaptasi dan mengembangkan pemodelan perhitungan kompleksitas yang diusung oleh W. H. El-Maraghy ke dalam ruang lingkup sangrai kopi, khususnya biji kopi Arabika Solok Radjo dan Robusta Bengkulu. Proses sangrai pada kajian ini dilakukan dengan temperatur pre-heating 160°C dan waktu penyangraian selama 16 menit. Berdasarkan kajian ini didapatkan hasil, bahwa aspek penting yang paling mempengaruhi kompleksitas sangrai biji kopi berdasarkan tingkatan sangrai adalah warna sangrai, massa, dan dimensi yang dihasilkan dari profil sangrai biji kopi. Selain itu, variasi RPM akan memengaruhi temperatur turning point dan titik akhir temperatur biji. Indeks kompleksitas tertinggi didapatkan pada biji kopi Robusta Bengkulu dengan RPM 90 dan memiliki tingkatan sangrai dark, yaitu sebesar 9,9.

Kata kunci: perancangan, proses kompleksitas, sangrai kopi, biji kopi arabika solok radjo, biji kopi robusta bengkulu.

Abstract

The process of roasting coffee to obtain consistent coffee bean product quality and in accordance with market preferences is quite complex and requires the expertise of operators who have years of experience. This study aims to present a model for calculating the complexity of the coffee roasting process manufacturing system as a type of measurement tool for a process to assess the existing process and estimate the initial costs at the design stage before increasing in the process of automation of the roasting process. The researcher adapted and developed the complexity calculation model proposed by W. H. El-Maraghy to the scope of coffee roasting, especially Solok Radjo Arabica and Bengkulu Robusta coffee beans. In this research, the roasting process was carried out with a pre-heating temperature of 160°C with a roasting duration of 16 minutes. Based on this research, the results show that the most important aspects that influence the complexity of roasting coffee beans based on roast level are roast color, mass, and dimensions resulting from the roast profile of coffee beans. In addition, variations in RPM will affect the temperature of the turning point and end point temperature of the beans. The highest complexity index was found in Bengkulu Robusta coffee beans with an RPM of 90 and a dark roast level of 9.9.

Keywords: design, complexity process, coffee roasting, arabica solok radjo coffee beans, robusta bengkulu coffee beans.

1. Pendahuluan

Kopi adalah salah satu minuman yang populer untuk dikonsumsi secara global karena efek positifnya yang dapat meningkatkan fokus dan mengatasi rasa keletihan. Indonesia berhasil menjadi produsen kopi nomor 4 terbesar di dunia dengan pertumbuhan industri kopi sebesar 250% selama 10 tahun terakhir [1]. Selain itu, perkembangan produksi kopi di Indonesia juga mengalami peningkatan antar tahunnya. Data mencatat bahwa pada tahun 2021, produksi kopi di Indonesia berada di angka 786,19 ton. Hal ini merupakan sebuah peningkatan sebesar 3,12 % dari tahun 2020 [2]. Pencapaian ini didukung pula dengan tingkat konsumsi domestik kopi rata-rata

yang meningkat 8,2% per tahun (120 ribu ton) dari 2016 sampai 2021 [3]. Peluang ini menjadi potensial bagi masyarakat Indonesia untuk turut mengembangkan proses bisnis kopi lokal dari hulu ke hilir. Di Indonesia, perkembangan bisnis kopi meningkat dari tahun ke tahun. Terhitung tahun 2019, kedai kopi di Indonesia berjumlah 2950 gerai, dan ini merupakan peningkatan sebesar tiga kali lipat dibandingkan dengan tahun 2016 [4]. Salah satu proses yang penting dalam pembuatan secangkir kopi yang siap disajikan untuk konsumen adalah proses sangrai kopi.

Sangrai kopi adalah sebuah proses dimana biji kopi hijau, yang belum mempunyai rasa yang diinginkan,

dipanaskan dalam sebuah mesin sangrai untuk mengeluarkan aroma dan cita rasa yang sangat khas di secangkir kopi. Menyangrai kopi menentukan 25% hasil mutu dari produk kopi [5]. Proses penting ini dapat diklasifikasikan menjadi beberapa tahapan: *setting*, *pre-heating*, *heating*, *charging*, dan *cooling*. Setiap tahapan mempengaruhi kualitas kopi yang dihasilkan; jika terjadi sebuah perubahan di salah satu tahap tersebut maka kopi yang dihasilkan akan memiliki citarasa dan kualitas yang berbeda.

Dalam proses sangrai sendiri, terdapat beberapa fase yang terjadi terhadap biji kopi, yaitu *drying*, dimana kandungan air dalam biji kopi akan menguap, kemudian *yellowing*, dimana reaksi pencoklatan mulai terjadi, kemudian *first crack*, dimana reaksi pencoklatan mulai bertambah cepat dan tekanan dalam biji kopi akan semakin besar sehingga biji kopi akan pecah yang akan menyebabkan volume biji kopi mengalami peningkatan. Kemudian baru masuk tahap *roast development*, dimana tahap ini bertujuan untuk menentukan tingkat kopi seperti apa yang diinginkan. Tahapan yang terakhir adalah *second crack*, dimana biji kopi akan mengalami retak yang kedua dan akan menghasilkan biji kopi yang berminyak [6].

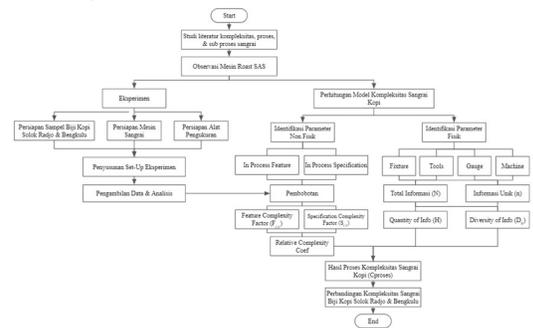
Proses sangrai kopi tersebut cukup kompleks dan memerlukan keahlian operator yang memiliki pengalaman bertahun-tahun. Sering sekali pengalaman tersebut dipelajari oleh diri sendiri melalui proses uji coba yang banyak dalam kurun waktu yang panjang. Ilmu dan keterampilan mengenai bagaimana sebuah biji kopi berubah dalam proses sangrai, temperatur apa yang cocok, mengatur laju udara di mesin sangrai, sampai dengan mengatur rotasinya drum sangrai merupakan hal yang penting untuk penyangrai. Semua parameter tersebut memiliki pengaruhnya masing-masing, seperti pengaruh RPM drum dalam proses sangrai. RPM drum akan memengaruhi seberapa banyak biji yang mengalami kontak dengan drum dan juga waktu jatuh biji kopi ketika drum berputar. Selain itu, apabila kecepatan diatur dengan rendah, maka akan menyebabkan biji kopi akan tersangrai dengan durasi yang lebih lama dan apabila kecepatan diatur dengan rendah maka biji kopi memiliki potensi untuk pecah di dalam mesin [7,8]. Oleh karena itu, para pemula penyangrai kopi pada umumnya memiliki kurva pembelajaran yang menantang saat memulai karier sangrai mereka. Jadi tidak heran proses sangrai kopi sering memiliki harga yang cukup tinggi dan bisa berubah harga jika satu variabel kecil pun diubah.

Berdasarkan masalah ini, peneliti mengusulkan penggunaan kompleksitas model W. H. El-Maraghy dalam proses sangrai kopi yang bertujuan untuk menentukan biaya proses tersebut dengan akurat. Dalam penelitiannya, W. H. El-Maraghy mengembangkan sebuah model penilaian untuk menentukan kompleksitas dan karakteristik suatu produk dan proses manufakturnya [9]. Penilaian kompleksitas tersebut dilihat dari segi kompleksitas

produk (*CI*), kompleksitas proses (*PI*), dan kompleksitas operasional (*OI*). Dia mendefinisikan kompleksitas sebagai jumlah informasi yang berkaitan dengan produk secara fisik dan proses pembuatannya. Peneliti percaya dengan menggunakan model ini dapat meningkatkan efektivitas dan efisiensi proses sangrai kopi.

2. Metode

Alur Kajian



Gambar 1. Diagram alur kajian.

Adapun beberapa tahapan yang terbagi dalam diagram alur kajian di atas sebagai berikut:

- 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 dan Arabika Solok Radjo dan Robusta Bengkulu, 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 dari sangrai biji kopi Arabika Solok Radjo dan Robusta Bengkulu menggunakan parameter pembobotan yang telah didapatkan.
- Membandingkan nilai kompleksitas proses sangrai biji kopi Arabika Solok Radjo dan Robusta Bengkulu.

Objek Kajian

Kajian ini memiliki objek utama untuk mengkalkulasikan proses kompleksitas dari sangrai kopi menggunakan mesin SAS Coffee Roaster R001-

V6 dan biji kopi Arabika Solok Radjo dan Robusta Bengkulu. Hasil dari proses sangrai dari kedua biji ini akan dibandingkan untuk menentukan mana yang lebih kompleks dan parameter apa saja yang mempengaruhi proses kompleksitas.

Alur Eksperimen

Eksperimen sangrai kopi akan berfungsi untuk pengumpulan data dalam menentukan nilai pembobotan tabel pada model proses kompleksitas sangrai kopi. Eksperimen ini akan menyangrai biji kopi Arabika Solok Radjo dan Robusta Bengkulu. Rancangan alur eksperimen akan dibagi ke dalam beberapa tahapan sebagai berikut:

- Menyalakan mesin SAS Coffee Roaster R001-V6 dan menghubungkan ke laptop yang telah dilengkapi dengan perangkat Artisan. Artisan akan merekam data temperatur dan waktu dari proses sangrai kopi.
- Menghubungkan *gas valve* mesin SAS Coffee Roaster ke sumber bahan bakar, kemudian menyalakan *burner*. Pengaturan pada mesin sangrai kopi sesuai dengan pembatasan masalah yang ada.
- Melakukan *pre-heating* untuk mencapai temperatur 160°C sebelum memasukan biji kopi ke dalam mesin sangrai.
- Memasukkan biji kopi ke dalam sangrai.
- 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.
- Menyangrai semua biji kopi hingga 16 menit setelah *charging* yang dimana sesuai hipotesis semua biji telah mengalami fase *development*.

Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam kajian ini adalah Mesin SAS Roaster R001 V-6, Perangkat Artisan, Jangka Sorong Digital, Timbangan Digital, *Photobox*, Kamera Canon EOS 550D, *Moisture Meter*, Arduino dan Termokopel Tipe K. *Moisture Meter* pada kajian ini digunakan sebagai alat ukur untuk dokumentasi profil kadar air dari biji kopi. Alat Arduino dan Termokopel Tipe K pada kajian ini digunakan untuk kalibrasi Mesin SAS Roaster R001 V-6.

Dalam kajian ini, bahan yang digunakan sebagai objek kajian yaitu biji kopi Arabika Solok Radjo dan biji kopi Robusta Bengkulu.

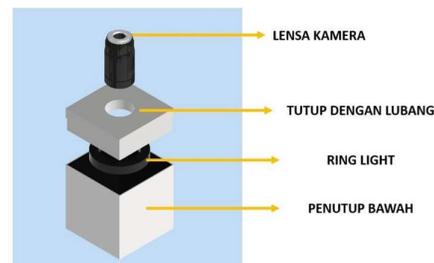
Metode Pengukuran

Pengukuran Warna

Pengukuran warna dilakukan menggunakan Kamera DSLR dan *Photobox* (dapat dilihat pada Gambar 2) . *Photobox* yang kedap cahaya dan dilengkapi oleh ring light akan digunakan sebagai media untuk pengambilan gambar. Kamera terlebih dahulu diatur agar dapat menangkap gambar biji kopi secara jelas. Pengaturan yang digunakan adalah: ISO 400, F 5.0, *Standard light settings*, *Manual Focus*, *Manual mode*, dan 1/100 *shutter speed*. Kemudian, sampel biji kopi diletakkan di atas wadah transparan dan dimasukkan kedalam *photobox*. Setelah itu, kamera DSLR akan mengambil gambar sampel yang berada di dalam *photobox* tersebut. Pengukuran ini akan dilakukan untuk setiap sampel agar dapat mengidentifikasi tingkat sangrai dari sampel tersebut.



Gambar 2. Photobox.



Gambar 3. Skema penempatan komponen photobox.

Photobox ini menggunakan skema yang mirip dengan penelitian yang sebelumnya sudah dilakukan tentang bagaimana cara mengambil citra biji kopi. Photobox ini dibuat kedap cahaya eksternal agar biji kopi di dalam photobox dapat diambil gambarnya secara maksimal dan mendapat nilai RGB untuk mendefinisikan perbedaan warnanya [10].

Pengukuran Volume

Pengukuran volume dilakukan menggunakan jangka sorong dengan ketelitian 0,01 mm. Kemudian dari sampel biji kopi akan diukur dan dicatat profil geometri berupa panjang (l), lebar (w), dan ketebalan (t). 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 [11].

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

V = Volume biji kopi (mm³)

l = panjang biji kopi (mm)

w = lebar biji kopi (mm)

t = ketebalan biji kopi (mm)

Data dari volume tiap sampel akan digunakan untuk menganalisis perubahan volume yang terjadi per 2 menit pengambilan sampel.

Pengukuran Massa

Pengukuran massa dilakukan menggunakan timbangan digital dengan ketelitian 0,01 gram. Pengukuran akan dilakukan dengan mengambil biji kopi sebesar 10±0,5 gram dan akan dihitung berapa jumlah biji kopinya. Data yang akan diambil adalah rata-rata massa per biji kopi. Data dari massa tiap sampel akan digunakan untuk menganalisis perubahan massa yang terjadi per 2 menit pengambilan sampel.

Identifikasi Parameter

Parameter Fisik

Parameter fisik adalah parameter yang berasal dari komponen fisik produk atau peralatan yang digunakan, seperti *fixture, tools, gauge, dan machine*.

- *Fixture* merupakan komponen yang digunakan untuk menjaga posisi objek agar tetap statis atau *fixed*.
- *Tools* merupakan komponen yang digunakan untuk membantu proses.
- *Gauge* merupakan komponen yang digunakan untuk mengukur sebuah objek.
- *Machine* merupakan peralatan atau mesin yang digunakan.

Parameter Non-Fisik

Parameter non-fisik terbagi menjadi dua, yaitu

- *In-process feature* merupakan parameter yang ditambahkan kedalam proses untuk membentuk produk sesuai standar.
- *In-process specification* merupakan parameter yang ditambahkan kedalam proses untuk menambahkan kualitas dan melebihi standar.

Persamaan Kompleksitas Proses Sangrai Kopi

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

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

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

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

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

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

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

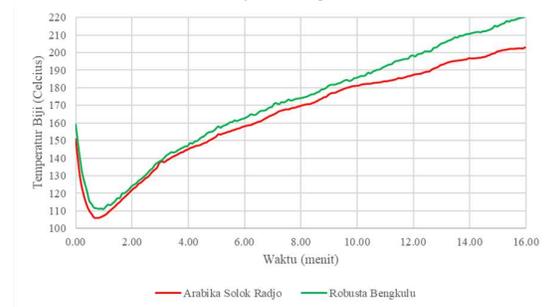
Dimana,

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>

3. Hasil dan Pembahasan.

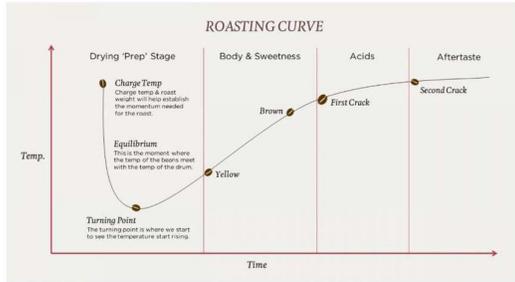
Hasil dan Analisis Profil Sangrai



Gambar 4. Hasil profil sangrai biji kopi Arabika Solok Radjo dan Robusta Bengkulu.

Berdasarkan eksperimen sangrai kopi yang telah dilaksanakan, didapatkan kurva hasil sangrai biji kopi Arabika Solok Radjo dan Robusta Bengkulu seperti pada Gambar 4. Grafik ini sesuai apabila dibandingkan dengan kurva hasil sangrai secara umum. Merujuk Gambar 5, dapat terlihat similaritas pada fase *turning point* setelah terjadi penurunan temperatur ketika dilakukan tahapan *charging* atau proses masuknya biji kopi ke dalam mesin sangrai. Selain itu dapat terlihat setelah proses *drying* selesai, akan terjadi peningkatan temperatur yang terus menerus seiring waktu hingga mencapai titik akhir temperatur dari kurva. Oleh karena itu terbukti bahwa

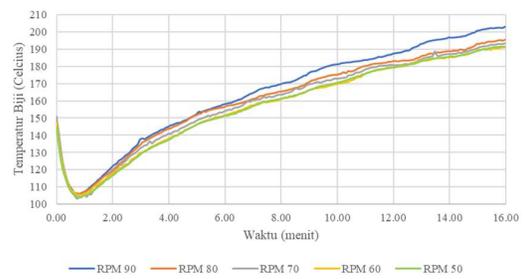
proses sangrai yang penulis telah lakukan valid untuk dianalisis lebih lanjut mengenai data pengukuran dan pemodelan kompleksitas proses sangrai kopi.



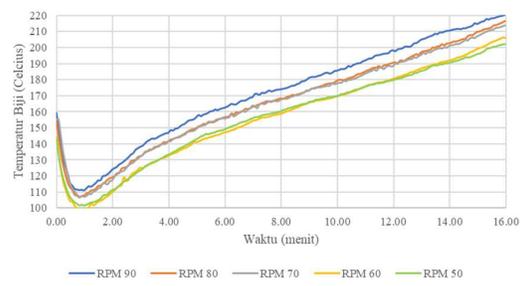
Gambar 5. Kurva profil sangrai biji kopi secara umum [12].

Hasil dan Analisis Pengaruh RPM

Untuk menelusuri pengaruh RPM terhadap profil sangrai biji kopi, penulis mengambil contoh perbandingan setiap variasi RPM pada sangrai biji kopi Robusta Bengkulu sebagai berikut



Gambar 6. Perbandingan profil sangrai biji kopi Arabika Solok Radjo RPM 90, 80, 70, 60, 50.



Gambar 7. Perbandingan profil sangrai biji kopi Robusta Bengkulu RPM 90, 80, 70, 60, 50.

Dapat diamati bahwa 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 disebabkan oleh 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 dan Gambar 7

untuk kedua biji kopi, yaitu Arabika Solok Radjo dan Robusta Bengkulu.

Hasil Pengukuran

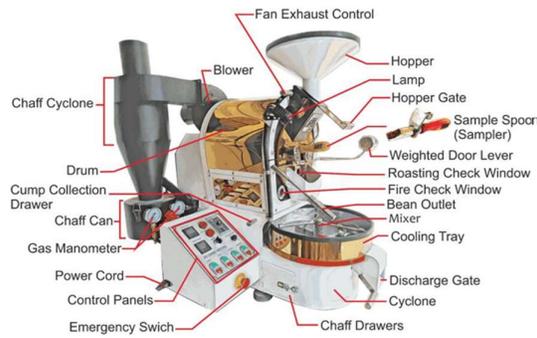
Tabel 1 merupakan hasil dari pengambilan data yang telah dilakukan. Pada Tabel 1, terlihat terjadi perubahan secara warna, volume, maupun massa. Berdasarkan hasil pengukuran warna tingkatan sangrai biji kopi diketahui bahwa semakin lama waktu dan semakin tinggi temperatur proses sangrai, maka hasil sangrai biji kopi akan menghasilkan warna yang semakin gelap. Perihal ini diakibatkan proses penyerapan panas oleh biji kopi dan reaksi Maillard dimana adanya reaksi antara gula pereduksi dengan asam amino sehingga biji kopi mengalami pencoklatan non-enzimatis. Reaksi ini juga akan membentuk senyawa volatil dan non-volatil. Biji kopi juga mengalami pembesaran setelah proses penyangraian. Hal ini terjadi karena air yang berubah menjadi uap saat proses pemanasan akan menciptakan tekanan tinggi dan mengubah dinding kopi dari 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. Selain itu, proses penyangraian juga mengubah massa dari biji kopi. Biji kopi yang sudah disangrai mengalami penurunan massa karena pada proses penyangraian suhu akan naik dan akan mengubah air yang berada di dalam biji kopi menjadi uap, atau dengan kata lain air yang berada dalam biji kopi mengalami penguapan dan massa biji kopi akan mengalami penyusutan [13,14].

Berdasarkan data yang telah diambil, hasil tersebut menunjukkan kesesuaian dengan kajian yang sebelumnya sudah dilakukan terkait bagaimana perubahan fisik yang terjadi terhadap biji kopi selama proses sangrai [11, 15-17].

Pemodelan Kompleksitas Proses Sangrai Kopi

Penentuan Parameter Fisik

Parameter fisik pada proses sangrai kopi merupakan parameter yang berasal komponen fisik produk atau peralatan mesin sangrai yang digunakan dalam memproduksi produk berupa sangrai biji kopi, yaitu *fixture, tools, gauge, dan machine*.



Gambar 8. Komponen-komponen mesin SAS Coffee Roaster [18].

Berdasarkan observasi yang dilakukan secara langsung pada mesin sangrai yang digunakan berupa mesin SAS Coffee Roaster R001-V6 dan studi literatur dari buku panduan mesin Roaster SAS didapatkan parameter fisik yang mendukung keseluruhan proses sangrai kopi beserta nilai H dan D_R dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil kajian.

		Waktu Sangrai								
		2 menit	4 menit	6 menit	8 menit	10 menit	12 menit	14 menit	16 menit	
Jenis Biji Kopi dan Variasi RPM	S-90	Warna	Light	Light	Light	Light	Light	Light	Medium	Dark
		Volume (mm ³)	166,58	178,06	178,45	191,16	220,71	239,72	241,92	269,98
		Massa (gram)	0,16	0,15	0,15	0,14	0,13	0,13	0,13	0,13
	S-80	Warna	Light	Light	Light	Light	Light	Light	Light	Medium
		Volume (mm ³)	130,23	186,54	223,84	227,13	229,75	238,1	241,05	261,24
		Massa (gram)	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,13	0,13
	S-70	Warna	Light	Light	Light	Light	Light	Light	Light	Medium
		Volume (mm ³)	116,04	118,63	141,52	178,37	181,35	188,97	204,2	267
		Massa (gram)	0,15	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,12
	S-60	Warna	Light	Light	Light	Light	Light	Light	Light	Medium
		Volume (mm ³)	129,7	137,76	192,92	198,1	248,64	248,73	261,39	308,08
		Massa (gram)	0,16	0,16	0,15	0,15	0,14	0,14	0,14	0,13
	S-50	Warna	Light	Light	Light	Light	Light	Light	Light	Medium
		Volume (mm ³)	129,8	169,43	174,68	199,43	212,32	235,19	240,04	290,66
		Massa (gram)	0,16	0,15	0,15	0,14	0,14	0,14	0,13	0,13
	B-90	Warna	Light	Light	Light	Light	Light	Light	Medium	Dark
		Volume (mm ³)	177,22	259,17	305,59	338,29	402,02	454,14	530,49	535,6
		Massa (gram)	0,25	0,23	0,23	0,23	0,23	0,2	0,21	0,16
	B-80	Warna	Light	Light	Light	Light	Light	Light	Medium	Dark
		Volume (mm ³)	157,35	313,58	292,68	316,36	375,7	379,61	382,32	591,76
Massa (gram)		0,27	0,24	0,23	0,23	0,23	0,22	0,21	0,2	
B-70	Warna	Light	Light	Light	Light	Light	Light	Light	Medium	
	Volume (mm ³)	176,36	220,84	297,59	305,87	353,79	365,98	363,41	432,41	
	Massa (gram)	0,26	0,25	0,24	0,24	0,23	0,21	0,21	0,21	
B-60	Warna	Light	Light	Light	Light	Light	Light	Light	Medium	
	Volume (mm ³)	165,37	212,43	303,88	346,08	347,77	358,51	429,98	482,17	
	Massa (gram)	0,26	0,24	0,23	0,23	0,23	0,22	0,22	0,21	
B-50	Warna	Light	Light	Light	Light	Light	Light	Light	Medium	
	Volume (mm ³)	164,11	243,6	251,97	264,89	331,64	424,74	504,23	519,25	
	Massa (gram)	0,26	0,26	0,24	0,23	0,23	0,23	0,21	0,2	

Tabel 3. Parameter fisik proses sangrai biji 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
	Emergency Switch	1	1
Tools	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
Total		35	34
H		5.17	
D_s		0.97	

Penentuan Parameter Non Fisik

Dalam mengembangkan parameter ini, diperlukan penetapan tahapan subproses yang ada dalam sangrai biji kopi. Berdasarkan studi literatur dan observasi, didapatkan sub proses sebagai berikut.

- *Setting*: Proses mengatur controls dan gauge saat menyalakan mesin sangrai seperti *gas pressure*, *airflow speed*, *fan exhaust*, dan RPM Drum.
- *Pre-heating*: Proses pemanasan drum mesin sangrai agar dapat menyangrai biji kopi dengan efektif sesuai dengan tujuan sangrai.
- *Charging*: Proses memasukkan biji kopi ke dalam mesin sangrai yang disesuaikan dengan kapasitas mesin dan tujuan produksi.
- *Heating*: Proses pemasakan biji kopi yang didasarkan pada tingkatan kualitas sangrai yang dituju sehingga temperatur dan waktu berpengaruh merupakan parameter penting.
- *Cooling*: Proses pemberhentian masaknya biji kopi sehingga tidak terjadi perubahan aroma dan mutu setelah disangrai.

Dari uraian sub proses di atas, dapat dikembangkan lebih lanjut tabel parameter non fisik dengan in-process feature dan in-process specification sebagai berikut.

Tabel 4. Parameter non fisik proses sangrai kopi.

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

Pembobotan

Berdasarkan pengukuran hasil eksperimen sangrai biji kopi terhadap warna, geometri, dan massa, maka dapat dilakukan pembobotan dengan konsep berupa

- Pembobotan warna dilakukan berdasarkan similaritas tingkatan sangrai terhadap standar SCA yang dihasilkan oleh setiap sampel dalam interval 2 sampai dengan 16 yang mengikuti lamanya waktu sangrai. Pada jenis pembobotan ini, dilakukan normalisasi min dan max karena pergerakan nilai waktu sangrai yang linear dan konstan perubahannya. Oleh karena itu, dilakukan pengembangan pembobotan dari hasil identifikasi warna tingkatan sangrai.

Tabel 5. Maksimum dan minimum perbandingan penurunan massa biji kopi Arabika Solok Radjo dan Robusta Bengkulu.

Pembobotan Warna berdasarkan Waktu dan Tingkatan Sangrai SCA							
0	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

- Pembobotan massa dilakukan berdasarkan perbandingan penurunan massa dari setiap sampel hasil sangrai biji kopi. Penurunan massa dibandingkan terhadap sampel menit ke-2 karena merupakan sampel pertama yang diobservasi dalam interval waktu penyangraian kopi. Nilai pembobotan ini akan diimplementasikan normalisasi logaritma sesuai dengan nilai maksimum dan nilai minimum dari perbandingan penurunan massa antara biji kopi Arabika Solok Radjo dan Robusta Bengkulu karena persebaran data yang tidak konsisten dan tidak linear. Oleh karena itu, dapat

diidentifikasi nilai minimum dan maksimum dari perbandingan penurunan massa.

Tabel 6. Maksimum dan minimum perbandingan penurunan massa biji kopi Arabika Solok Radjo dan Robusta Bengkulu.

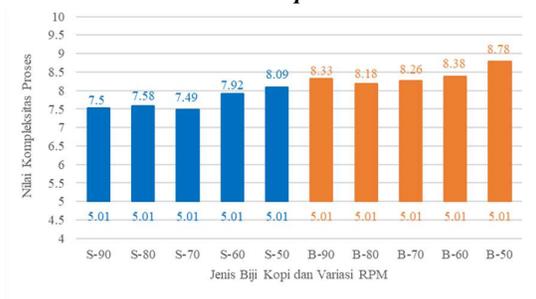
Perbandingan Penurunan Massa	
Nilai maksimum (n_{max})	0.64
Nilai minimum (n_{min})	1.00

- Pembobotan volume dilakukan berdasarkan perbandingan ekspansi volume dari setiap sampel hasil sangrai biji kopi. Ekspansi volume dibandingkan terhadap sampel menit ke-2 karena merupakan sampel pertama yang diobservasi dalam interval waktu penyangraian kopi. Nilai pembobotan ini juga akan diimplementasikan normalisasi logaritma sesuai dengan nilai maksimum dan nilai minimum dari perbandingan ekspansi volume antara biji kopi Arabika Solok Radjo dan Robusta Bengkulu karena persebaran data yang tidak konsisten dan tidak linear. Oleh karena itu, dapat diidentifikasi nilai minimum dan maksimum dari perbandingan ekspansi volume.

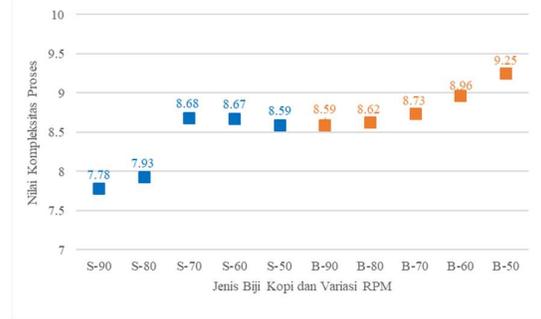
Tabel 7. Maksimum dan minimum perbandingan ekspansi volume biji kopi Arabika Solok Radjo dan Robusta Bengkulu.

Perbandingan Ekspansi Volume	
Nilai maksimum (n_{max})	3.76
Nilai minimum (n_{min})	1.00

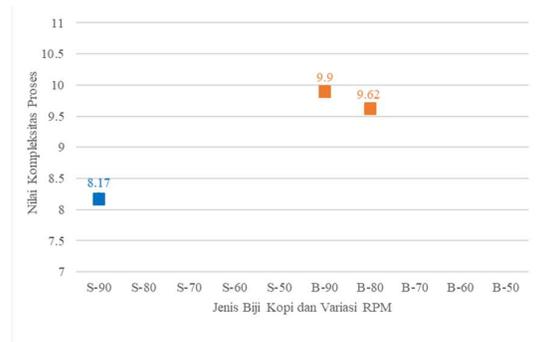
Hasil Kalkulasi Indeks Kompleksitas



Gambar 9. Indeks kompleksitas proses sangrai kopi untuk biji kopi Arabika Solok Radjo dan Robusta Bengkulu dengan tingkatan *Light roast*.



Gambar 10. Indeks kompleksitas proses sangrai kopi untuk biji kopi Arabika Solok Radjo dan Robusta Bengkulu dengan tingkatan *Medium roast*.



Gambar 11. Indeks kompleksitas proses sangrai kopi untuk biji kopi Arabika Solok Radjo dan Robusta Bengkulu dengan tingkatan *Dark roast*.

Secara garis besar tren indeks kompleksitas proses sangrai kopi cenderung naik seiring dengan terjadinya penurunan nilai RPM. Tren ini tervalidasi dengan kajian literatur terkait pengaruh RPM yang memperlambat waktunya *development* untuk profil sangrai biji kopi sehingga temperatur akhir yang dituju akan menghabiskan waktu yang lebih panjang sehingga sesuai dengan hasil pengukuran warna sangrai biji kopi Arabika Solok Radjo ataupun Robusta Bengkulu, didapatkan interval untuk mencapai tingkatan sangrai *Light Roast* yang lebih panjang juga.

Perbedaan indeks kompleksitas proses sangrai kopi antara biji kopi Arabika Solok Radjo dan Robusta Bengkulu yang menunjukkan bahwa biji kopi Robusta Bengkulu memiliki nilai indeks kompleksitas proses yang lebih tinggi dari Arabika Solok Radjo. Perbedaan ini dapat tervalidasi dari data penurunan massa dan ekspansi volume biji kopi Robusta Bengkulu yang lebih besar akibat profil sangrai yang dapat mencapai temperatur yang lebih tinggi dalam waktu yang relatif lebih singkat dibandingkan dengan Arabika Solok Radjo sesuai dengan hasil pengukuran sampel.

Perbedaan kajian ini dengan sebelumnya adalah kajian ini menyatukan beberapa Metode yang telah dilakukan pada penelitian sebelumnya. W.H. El Maraghy dan R. J. Urbanic menggunakan

pemodelan kompleksitas untuk melakukan penilaian dari kompleksitas operasional [19]. Kemudian, S.N. Samy dan H. El Maraghy mengembangkan pemodelan kompleksitas untuk mengukur kompleksitas dari perakitan produk [20]. Selain itu, beberapa yang telah menganalisis perubahan yang terjadi selama proses sangrai [11, 15-17] dikembangkan oleh kajian ini menuju kuantifikasi proses menggunakan Metode yang dikemukakan oleh W.H. El Maraghy yang kedepannya dapat digunakan untuk otomatisasi pada mesin sangrai kopi.

4. Kesimpulan

Berdasarkan kajian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa Subproses yang paling mempengaruhi perbedaan nilai kompleksitas proses sangrai biji kopi yaitu *heating* karena perbedaan jangka waktu mempengaruhi tingkatan sangrai biji kopi. Selain itu, Aspek penting yang paling mempengaruhi kompleksitas sangrai biji kopi berdasarkan tingkatan sangrai adalah warna sangrai, massa, dan dimensi yang dihasilkan dari profil sangrai biji kopi. Variasi RPM akan memengaruhi temperatur *turning point* dan titik akhir temperatur biji dari biji kopi. Sehingga kenaikan RPM akan mempercepat proses sangrai kopi untuk mencapai tingkatan sangrai *dark* karena suhu akan naik dengan lebih cepat.

Indeks kompleksitas yang didapatkan berdasarkan hasil kajian untuk biji kopi Arabika Solok Radjo pada RPM 90 dengan tingkatan sangrai *light* adalah 5,01-7,5, tingkatan sangrai *medium* adalah 7,78, tingkatan sangrai *dark* 8,7; kemudian pada RPM 80 dengan tingkatan sangrai *light* adalah 5,01-7,58 dan tingkatan sangrai *medium* adalah 7,93; pada RPM 70 dengan tingkatan sangrai *light* adalah 5,01-7,49 dan tingkatan sangrai *medium* adalah 8,68; pada RPM 60 dengan tingkatan sangrai *light* adalah 5,01-7,92 dan tingkatan sangrai *medium* adalah 8,67; pada RPM 50 dengan tingkatan sangrai *light* adalah 5,01-8,09 dan tingkatan sangrai *medium* adalah 8,59.

Kemudian, untuk indeks kompleksitas dari biji kopi Robusta Bengkulu, didapatkan hasil untuk RPM 90 dengan tingkatan sangrai *light* adalah 5,01-8,33, tingkatan sangrai *medium* adalah 8,59, tingkatan sangrai *dark* 9,9; kemudian pada RPM 80 dengan tingkatan sangrai *light* adalah 5,01-8,18, tingkatan sangrai *medium* adalah 8,62 dan tingkatan sangrai *dark* adalah 9,62; pada RPM 70 dengan tingkatan sangrai *light* adalah 5,01-8,26 dan tingkatan sangrai *medium* adalah 8,73; pada RPM 60 dengan tingkatan sangrai *light* adalah 5,01-8,38 dan tingkatan sangrai *medium* adalah 8,96; pada RPM 50 dengan tingkatan sangrai *light* adalah 5,01-8,78 dan tingkatan sangrai *medium* adalah 9,25

Ucapan Terima Kasih

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

Daftar Pustaka

- [1] Kementerian Koordinator Bidang Perekonomian, 2021, *Pemerintah Apresiasi Kolaborasi Mendorong Pertumbuhan Industri Kopi Indonesia*. <https://www.ekon.go.id/publikasi/detail/3342/pemerintah-apresiasi-kolaborasi-mendorong-pertumbuhan-industri-kopi-indonesia>. diakses 1 Oktober 2022
- [2] Badan Pusat Statistik Indonesia. 2021. *Statistik Kopi Indonesia 2021*. Jakarta.
- [3] Iconomics, 2021, *Tren Konsumsi Kopi Nasional*. <https://www.theiconomics.com/infographic/38699/>, diakses 1 Oktober 2022.
- [4] Toffin Indonesia. (2020, November 12). *2020 Brewing in Indonesia*. Toffin Insight. <https://insight.toffin.id/toffin-stories/toffin-indonesia-merilis-riset-2020-brewing-in-indonesia/>. diakses 31 Maret 2023
- [5] Badan Standardisasi Nasional, 2020, Diskusi dan Sharing SNI Biji Kopi. https://binaumk.bsn.go.id/uploads/materi/master_file/c0f626e0ab83bbfbb0eaae8c7c5fe0d4.pdf. diakses 1 Oktober 2022
- [6] Hoffmann, J. (2018). *The World Atlas of Coffee*. Mitchell Beazley.
- [7] Gallagher, J. (2019, June 27). *Understanding Roaster Drum Speed & Its Affect on Your Coffee. Perfect Daily Grind*. <https://perfectdailygrind.com/2019/06/understanding-roaster-drum-speed-its-affect-on-your-coffee/>. diakses 31 Maret 2023
- [8] Budiarto, M. A. (2018). *Analisa Pengaruh Putaran Pengaduk dan Temperatur Permukaan Tabung Mesin Penyangrai Kopi Dengan Pemanas Induksi Terhadap Efisiensi Waktu Pematangan Biji Kopi*. Repository.untag-Sby.ac.id. <http://repository.untag-sby.ac.id/753/>
- [9] El Maraghy, W.H. and Urbanic, R.J. 2003, *Modelling of Manufacturing Systems Complexity*. Journal of CIRP Annals, Vol. 52, 363-366
- [10] Suud, Hasbi M, Savitri, Dyah A, & Ismaya, Safa R. (2021). *Perubahan Sifat Fisik Dan Cita Rasa Kopi Arabika Asal Bondowoso Pada Berbagai Tingkat Penyangraian*. Jurnal Agrotek, 70-75
- [11] 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

- [12] Lincoln & York. (2019). *How Are Coffee Beans Roasted?* | *Roasting Coffee* | Lincoln & York. www.lincolnandyork.com. <https://www.lincolnandyork.com/blog/how-are-coffee-beans-roasted>
- [13] Jansen, Gerhard A. (2006). *Coffee Roasting Magic - Art - Science*. SV Corporate Media.
- [14] Illy, A., & Viani, R. (2005). *Espresso Coffee: The Science of Quality*. Elsevier Academic.
- [15] Dutra, E., Oliveira, L., Franca, A., Ferraz, V., & Afonso, R. (2001). *A preliminary study on the feasibility of using the composition of coffee roasting exhaust gas for the determination of the degree of roast*. *Journal of Food Engineering* 47, 241-246.
- [16] Hernandez, J., Heyd, B., Irls, C., Valdovinos, B., & Trystram, G. (2007). *Analysis of the heat and mass transfer during coffee batch roasting*. *Journal of Food Engineering* 78, 1141-1148.
- [17] Edzuan, A. F., Aliah, A. N., & Bong, H. (2015). *Physical and Chemical Property Changes of Coffee Beans during Roasting*. *American Journal of Chemistry*, 56-60
- [18] PT. SAS Coffee Roaster. (n.d.). *Buku Panduan Mesin Roaster SAS*.
- [19] El-Maraghy, W.H. (2006). *Assessment of Manufacturing Operational Complexity*. University of Windsor, Windsor, Ontario, Canada.
- [20] Samy, S.N., ElMaraghy, H. (2010). *A model for measuring products assembly complexity*. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 1015-1027.