

Pengaturan Suhu Penyangraian Kopi Rumahan Bahan Bakar Gas Menggunakan Aktuator *Motorized Ball-Valve*

Enas Duhri Kusuma, Muhammad Ridhwan Habib Abdillah, Taqiyuddin Hammam, Prpto Nugroho
Departemen Teknik Elektro dan Teknologi Informasi, Universitas Gadjah Mada
e-mail: enas@ugm.ac.id

Abstract—Home-scale coffee roasting has inconsistencies in the results related to subjective estimation of operators. Each operator has his own standard of roasted coffee beans quality assessments. One reason of that inconsistency is manual fire setting to adjust the roasting temperature. Therefore, the solution offered in this paper is the automatic temperature control based on the gas valve opening. The valve will be controlled by an electric motor connected to an additional module in the form of a relay driver. This additional relay driver module is controlled with a microcontroller running PID controller method to adjust the ball valve opening on the gas line.

Keywords—coffee beans, coffee roaster, PID control, motorized ball valve

Abstract—Penyangraian kopi skala rumahan mempunyai ketidakkonsistenan dalam hasil penyangraian yang diakibatkan estimasi kematangan subjektif oleh operator. Setiap operator memiliki standar penilaian tersendiri dalam menilai kualitas biji kopi yang disangrai. Salah satu alasan ketidakkonsistenan ini adalah pengaturan besar kecilnya api secara manual untuk menentukan suhu penyangraian. Oleh karena itu, solusi yang ditawarkan pada makalah ini berupa pengendalian suhu secara otomatis berdasarkan bukaan katup gas yang akan dikendalikan oleh motor listrik yang terhubung ke modul tambahan berupa driver relay. Modul tambahan driver relay ini dikendalikan dengan mikrokontroler yang menjalankan pengendali PID untuk mengatur bukaan ball valve pada saluran gas.

Kata kunci—biji kopi, roaster kopi, kendali PID, motorized ball valve

I. PENGANTAR

Dalam proses penyangraian kopi, terdapat beberapa variabel yang menentukan kualitas hasil penyangraian kopi. Walaupun begitu, tidak semua penyangrai kopi faham mengenai patokan standar penyangraian kopi yang baik. Dibutuhkan pengalaman dengan waktu yang lama agar terbiasa dan menjadi ahli. Dalam melakukan penyangraian kopi, terdapat beberapa proses transmisi panas yakni radiasi, konduksi, dan konveksi pada biji kopi. Hal ini sangat memengaruhi grafik fase perubahan suhu kopi selama waktu pemanggangan atau yang biasa disebut dengan profil suhu kopi [1].

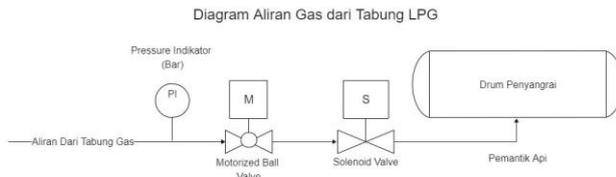
Proses roasting adalah salah satu langkah penting dalam mengubah green bean menjadi minuman kopi yang lezat. Proses ini timbul dari beberapa senyawa kimia pada saat proses roasting dimana banyak senyawa aromatik yang mudah menguap membuat tekstur biji kopi kering

dan rapuh sehingga terjadi penghancuran biji kopi dan dapat diekstraksi. Proses pemanasan kering pada kopi mencapai suhu relatif tinggi hingga 250 °C [1]. Penyangraian kopi adalah salah satu proses pascapanen yang berfungsi mengolah bahan baku dan mendapatkan cita rasa kopi. Pada proses penyangraian, kadar air biji kopi dikurangi sehingga sesuai SNI 8964:2021 yaitu maksimal 5% dari sebelum biji disangrai. Adapun sebelum penyangraian, sesuai SNI 01-2907:2008 kadar air biji kopi idealnya maksimal 12,5%. Profil suhu penyangraian sangat mempengaruhi hasil akhir yang diperoleh. Umumnya, hasil penyangraian dibagi menjadi tiga tingkatan, yaitu light roast, medium roast, dan dark roast [4]. Pengamatan proses sangria dapat dilakukan melalui tiga cara, yang pertama melalui aroma dari asap yang dihasilkan pada proses penyangraian, melalui suhu dari biji kopi saat proses penyangraian dan yang terakhir melalui warna biji kopi setelah proses penyangraian [4]. Proses penyangraian yang dapat dipantau dengan parameter suhu biji kopi membuat penulis melakukan penelitian ini. Penelitian ini dilakukan dengan cara mengendalikan suhu biji kopi saat proses penyangraian sehingga dapat sama dengan grafik suhu biji kopi referensi.

Pada makalah ini disajikan sebuah solusi berupa modul tambahan atau *add-ons* pada mesin penyangrai kopi. Modul ini dirancang untuk memberikan kemudahan bagi para operator terutama yang awam berupa otomasi pengendalian suhu penyangrai dengan acuan profil suhu penyangraian kopi. Profil suhu tersebut telah teruji menghasilkan kualitas sangrai yang baik untuk biji kopi robusta. Profil suhu penyangraian kopi adalah sebuah garis atau kurva suhu terhadap waktu yang menjadi acuan suhu seharusnya pada mesin penyangrai yang sedang berjalan. Mesin penyangrai akan mengikuti suhu dari referensi yang telah ditetapkan dengan menggunakan kendali PID. Pada bagian umpan balik digunakan data pembacaan dari *thermocouple*[5] yang akan diumpan balik ke mikrokontroler untuk melalui pengolahan isyarat. Pengolahan isyarat dilakukan dengan perhitungan proporsional, integral, dan derivatif. Outputnya digunakan untuk memberi instruksi pada motor servo sebagai aktuator untuk mengendalikan katup gas LPG[6]. Dari situ diharapkan, besar kecilnya api dapat dikendalikan dan suhu penyangraian tetap terjaga mengikuti alur profil suhu penyangraian kopi yang telah ditetapkan.

II. METODE

A. Pengukuran Suhu, Pemantikan dan Pengaliran LPG



Gambar 1. Ilustrasi sistem secara garis besar

Ilustrasi aliran gas dari tabung ke kompor secara global ditunjukkan oleh Gambar 1. Pada mesin roaster kopi ini sudah terdapat *ignition control* HW-211 sebagai pemantik yang dipicu oleh *solenoid valve* yang memiliki prinsip kerja *switching on-off*. Pengendalian *on-off* saja menyebabkan grafik kendali suhu kurang halus, sehingga perlu ditambahkan aktuator berupa *motorized ball valve* untuk mengatasi grafik suhu kendali agar perubahan suhunya lebih halus. Gas yang mengalir dari LPG akan diatur keluarannya oleh *motorized ball valve*, selanjutnya gas akan melewati *solenoid valve* dan pemantik akan aktif sehingga api menyala. Fungsi *solenoid valve* adalah sebagai lintasan *bypass* sehingga *solenoid valve* dalam keadaan on dan sebagai *emergency stop* sewaktu-waktu ketika suhu sudah mencapai batas maksimum sehingga *solenoid valve* dapat ditutup. Adanya tambahan berupa *motorized ball valve* diharapkan dapat memperhalus kenaikan dan penurunan suhu menyesuaikan dengan referensi suhu yang sudah ada. Adapun pengukuran suhu aktual dilakukan menggunakan termokopel dengan modul MAX6675 [7,8]. Hasil pembacaan suhu ini nantinya akan dibandingkan dengan nilai referensi suhu penyangraian yang diinginkan lalu selisih nilai dari keduanya akan menjadi masukan ke pengendali kemudian diproses oleh algoritma kendali untuk mengatur bukaan *ball valve*.

B. Referensi Suhu dan Metode Tracking-nya

Grafik referensi suhu penyangraian kopi didapat dengan melakukan perekaman suhu roasting di suatu kedai kopi lalu dijadikan referensi untuk menghasilkan sangraian kopi yang baik. Hal ini dijadikan referensi tetap untuk jenis kopi tertentu dengan kualitas, bahan, dan dengan jumlah yang spesifik yang telah ditentukan sebagai batasan-batasan dari mesin roasting pada project ini. Grafik referensi suhu ini dipakai agar proses roasting biji kopi dapat menghasilkan produk dengan kualitas sangrai yang konsisten.

Pengembangan kendali PID berguna untuk mengurangi masalah pada proses roasting dengan kendali *hysteresis*[9,10] yang sering menghasilkan suhu melebihi dari referensi yang diinginkan. Respon dari metode kendali *hysteresis* ini relatif lambat sehingga akan mempengaruhi hasil penyangraian kopi. Oleh karenanya, bukaan katup gas perlu diatur sedemikian rupa agar dapat mengendalikan besar kecilnya api dan suhu penyangraian tetap pada grafik yang diinginkan.

C. Batasan Masalah

Pada penelitian ini, dilakukan pembatasan masalah. Di antaranya, biji kopi yang digunakan berjenis robusta, dengan massa biji kopi 500 gram dan kadar air kurang lebih 12%.

Pembatasan berikutnya adalah terkait suhu maksimum yaitu 250 °C. Terdapat *solenoid valve* sebagai bagian *roaster* yang berfungsi sebagai *emergency stop valve* dan mematikan kompor ketika suhu melebihi 250 °C. Bukaan katup pada pengendalian *roaster* ini dibatasi dengan bukaan katup minimum dan maksimum. Selain itu, motor servo dibatasi dengan sudut menutup sebesar 40° dan pada sudut 0° *ball valve* akan terbuka.

D. Metode Validasi Hasil

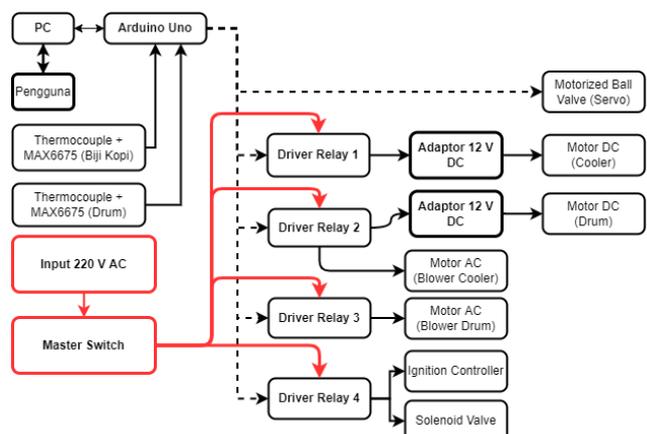
Pada makalah ini, akan dibahas pengendalian suhu roaster untuk mengikuti trajektori suhu yang diberikan. Untuk mengonfirmasi dan memvalidasi hasil pengendalian pada sistem ini, digunakan standar pengukuran berdasarkan galat antara suhu referensi dan suhu yang dihasilkan oleh sistem. Semakin kecil galat, semakin bagus unjuk kerja sistem.

III. IMPLEMENTASI

A. Perangkat Keras Secara Umum

Gambar 2 menunjukkan diagram blok implementasi perancangan hardware secara keseluruhan ke mesin roaster kopi. Terdapat dua buah sensor termokopel yang terhubung ke mikrokontroler (MCU) dalam *development board* Arduino Uno. Pada MCU tersebut, terdapat rutin untuk mengendalikan relay serta mengatur sudut bukaan *motorized ball valve*.

Selain itu monitoring suhu dan grafik dilakukan pada PC dengan menampilkan hasil dari pembacaan sensor dari Arduino. Aplikasi GUI yang digunakan disini berupa software Coffee Roasto GUI yang merupakan produk *capstone project* yang sudah ada sebelumnya, hanya saja pada penelitian kali ini dilakukan sedikit modifikasi tampilan dan menambah kendali aktuator servo serta indikator pilot lamp pada aplikasi.

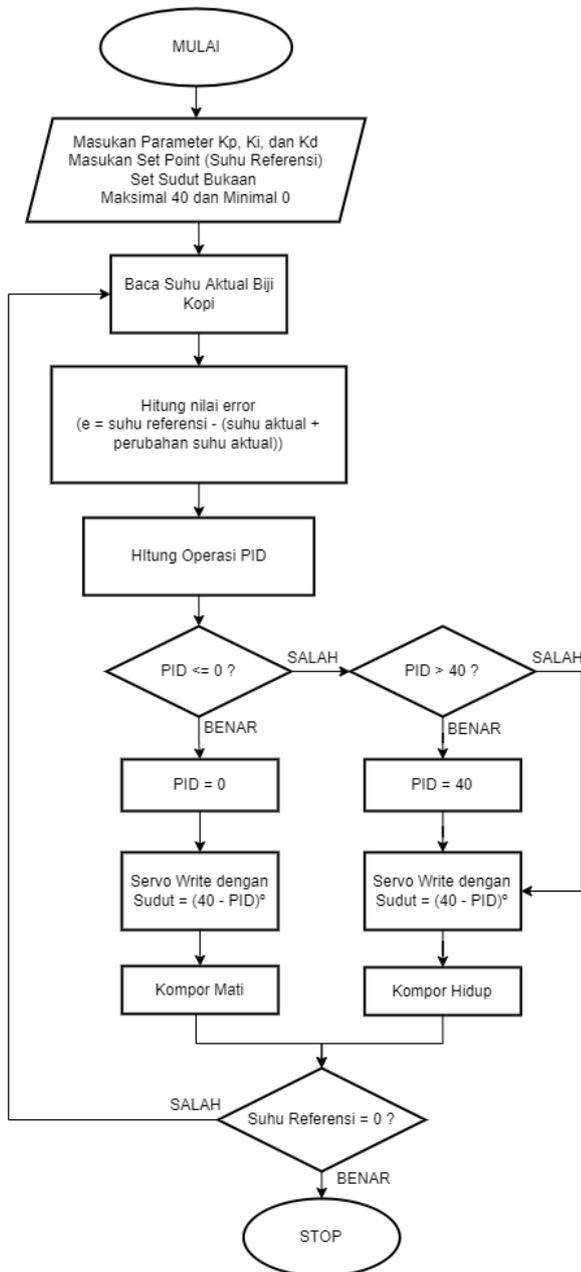


Gambar 2. Blok Diagram Hardware Keseluruhan

B. Penerapan Algoritma Kendali

Kendali PID pada penelitian ini mengendalikan bukaan *ball valve* dengan menggunakan motor servo sebagai pemutar *valve*. Bukaan *valve* ini berdasarkan sudut bukaan pada program kendali servo yang nilai sudutnya didapatkan dari hasil perhitungan PID [6].

Algoritma kendali diterapkan dalam gaya pemrograman Arduino [9,10,11,12]. Konstanta-konstanta PID yang didapatkan dari fitur *autotune* PID pada MATLAB dan digunakan pada *capstone project* ini yakni: $K_p = 21.095$, $K_i = 0.2$, dan $K_d = 30$.



Gambar 3. Diagram alir algoritma pengendalian

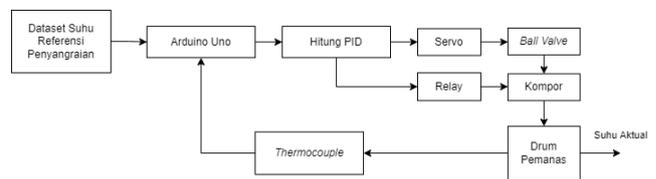
Motorized ball valve yang digunakan untuk penelitian ini, memiliki batasan sudut dari menutup secara penuh sampai membuka penuh. Jika posisi menutup secara

penuh adalah 0°, posisi membuka penuh adalah 40°. Untuk itu, servo yang digunakan adalah servo *custom*, bukan servo standar. Servo *custom*, selain memiliki torsi yang lebih besar untuk memutar *ball-valve*, juga bisa diatur untuk bekerja pada range sudut 0°- 40° saja dan tidak dapat melebihi itu. Rutin pengendalian digambarkan melalui diagram alir pada Gambar 3. Pada perhitungan PID nilai error didapatkan dari selisih suhu referensi terhadap suhu aktual biji kopi ditambah nilai delta atau perubahan suhu saat ini terhadap suhu sebelumnya.

Ketika perhitungan error menghasilkan nilai positif maka nilai PID akan besar dengan batas maksimum 40 artinya suhu aktual masih kurang dari suhu referensi sehingga mikrokontroler akan memberikan perintah untuk membuka saluran *valve* dengan motor servo. Sedangkan, ketika perhitungan error berupa nilai negatif maka nilai PID akan kecil dan dibatasi sampai 0 artinya suhu aktual telah melebihi suhu referensi sehingga mikrokontroler akan memberikan perintah untuk menutup saluran *valve* dengan motor servo. Selain itu, hasil keluaran persamaan PID juga dijadikan patokan untuk pengendalian *on-off ignition control* pada kompor dan buka tutup *solenoid valve* dengan kondisi sebagai berikut:

- Jika keluaran dari perhitungan PID bernilai maksimum yakni 40 dan kondisi *state* kompor dalam keadaan *false* atau mati maka kompor akan dinyalakan dan *solenoid valve* akan membuka.
- Sedangkan jika keluaran perhitungan PID bernilai minimum yakni 0 dan kondisi *state* kompor dalam keadaan *true* atau nyala maka kompor akan mati dan *solenoid valve* akan menutup.

Pengendalian PID termodifikasi digunakan untuk mengurangi fluktuasi pada saat proses penyesuaian suhu, dan juga mengurangi efek *deadtime* yang ada pada mesin. Diagram sistem kendali yang diterapkan adalah seperti pada Gambar 4.



Gambar 4. Diagram sistem kendali

Mikrokontroler pada rancangan ini, melakukan pembacaan termokopel untuk mengetahui suhu biji kopi. Suhu biji kopi tersebut akan jadi variabel untuk menjalankan algoritma PID, yang juga dieksekusi di mikrokontroler. Dari hasil PID, akan didapatkan nilai untuk diberikan ke servo pengatur laju gas, dan keadaan ON atau OFF relay.

C. Perhitungan PID

Algoritma PID yang dijalankan pada Arduino[8] dapat dinyatakan lewat urutan operasi pada Tabel 1. Pada

diagram alir pengendalian Gambar 3, algoritma PID terletak pada proses "Hitung PID".

Tabel 1. Realisasi Algoritma PID[11]

Step	Operasi
1	$\Delta \text{Suhu} = \text{Suhu_Sekarang} - \text{Suhu_Sebelumnya}$
2	$\text{Error}(n) = \text{Suhu_Referensi} - (\text{Suhu_Aktual} + \Delta \text{Suhu})$
3	$\text{Error_Sebelumnya} = \text{Error}(n-1)$
4	$\text{Selisih_Error} = \text{Error}(n) - \text{Error_Sebelumnya}$
5	$\text{Penjumlahan_Error} = \text{Error}(n) + \text{Error_Sebelumnya}$
6	$\text{Proporsional} = \text{Error} * K_p$
7	$\text{Integral} = K_i * \text{Penjumlahan_Error}$
8	$\text{Derivatif} = K_d * \text{Selisih_Error}$
10	$\text{PID} = \text{Proporsional} + \text{Integral} + \text{Derivatif}$

K_p , K_i , dan K_d , masing-masing adalah konstanta proporsional, integral, dan diferensial pada algoritma PID. Selain ketiga parameter tadi, objek-objek lain pada algoritma Tabel 1 adalah variabel-variabel bantu pengendalian. Ada yang berbentuk vektor, yaitu variabel Error dengan panjang sesuai jumlah pencuplikan, sedangkan variabel-variabel lain berbentuk skalar.

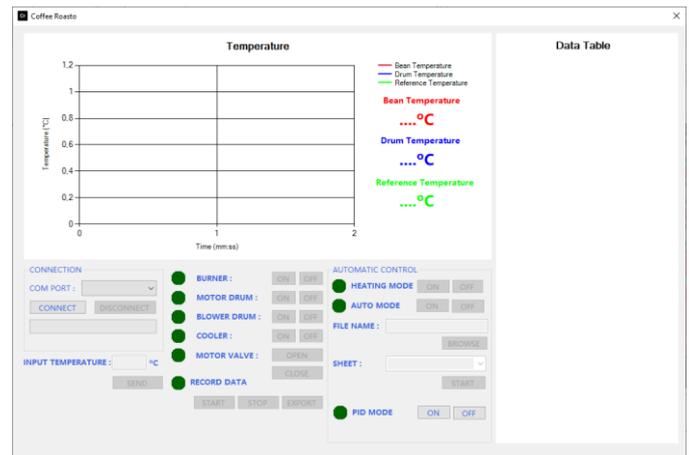
D. User Interface

Antarmuka aplikasi desktop *Coffee Roasto* terdiri dari satu halaman yang sudah mencakup semua fungsi dan fitur yang dibutuhkan pengguna. Diantaranya fitur untuk menampilkan data suhu kedalam grafik dan menampilkan data suhu referensi pada tabel. Fitur otomatis untuk proses *heating* dan penyangraian otomatis membuat pengguna dapat melakukan penyangraian secara otomatis berdasarkan suhu referensi yang dipilih pengguna. Fitur perekaman data untuk dijadikan suhu referensi dalam proses penyangraian otomatis dan fitur untuk mematikan atau menyalakan *burner*, *motor drum*, *blower drum*, *cooler* secara manual.

Kemudian Gambar 5 merupakan modifikasi *user interface* dilakukan dengan menambahkan fitur kendali PID Mode dengan cara memberikan *button on* dan *off* untuk memberikan isyarat masukan melalui komunikasi serial ke Arduino sehingga Arduino dapat menjalankan aktuator servo. Selain itu terdapat tambahan pilot lamp untuk motor valve sebagai indikator buka dan tutup dari ball valve.

Antarmuka pengguna ini berguna untuk menampilkan grafik trajektori suhu penyangraian, dan membandingkannya dengan suhu referensi. Di samping itu, antarmuka, sebagaimana namanya, berfungsi sebagai media interaksi antara pengguna dengan mesin *roaster* dan melakukan *setting* pada mesin tersebut.

IV. PENGUJIAN DAN PEMBAHASAN

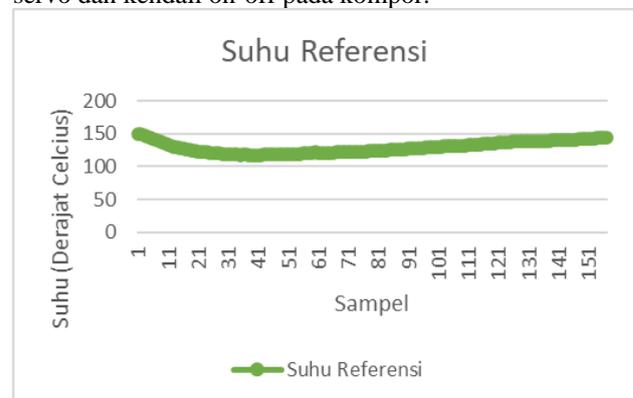


Gambar 5. Tampilan *User Interface*

A. Pengujian Sistem Kendali Suhu

Pengujian sistem kendali suhu pada mesin roaster dilakukan dengan cara melakukan roasting biji kopi secara otomatis menggunakan kendali PID. Kemudian, hasil pembacaan suhu dan suhu referensi diplot pada sebuah grafik. Tujuan dari pengujian ini adalah memastikan modul kendali mampu melakukan pengendalian suhu sesuai dengan suhu referensi yang telah ditentukan melalui dataset selain itu dilakukan analisis persen error terhadap suhu referensi[13].

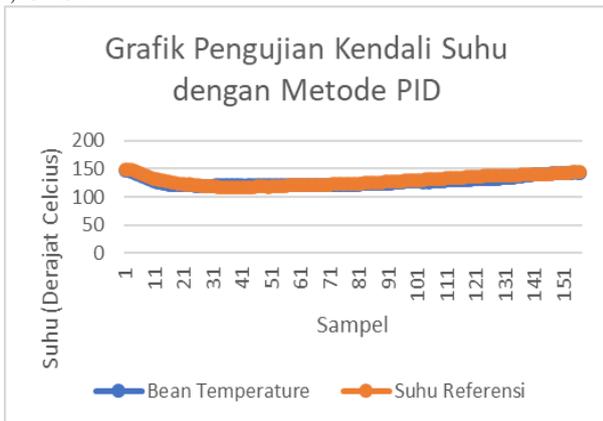
Suhu referensi yang dijadikan acuan merupakan suhu biji kopi yang diambil dengan mesin roaster secara manual. Gambar 6 merupakan grafik suhu referensi yang dijadikan acuan atau setpoint sistem kendali pada pengujian ini. Suhu referensi berupa file excel yang kemudian dimasukkan ke perangkat Arduino untuk kemudian menjadi input perhitungan PID bersama dengan hasil pembacaan suhu biji kopi aktual sehingga keluaran fungsi PID dapat menentukan sudut bukaan servo dan kendali on-off pada kompor.



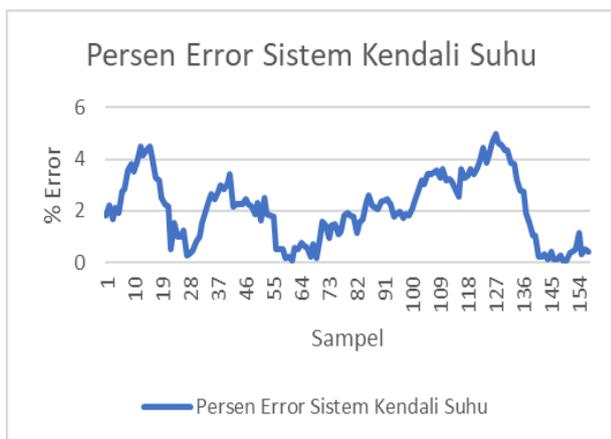
Gambar 6 Grafik Suhu Referensi

Metode pengujian dilakukan dengan membandingkan grafik suhu hasil penyangraian dengan suhu referensi. Gambar 7 menunjukkan hasil grafik suhu dari sistem kendali PID yang diuji. Gambar 8 menunjukkan persen error untuk masing-masing suhu pengujian dari grafik persen error dapat diketahui bahwa suhu biji kopi sudah berhasil dikendalikan agar selalu mengikuti suhu

referensi yang diinginkan dengan persen error paling tinggi sebesar 4,98 %, rata-rata selisih absolut sebesar 2,73 °C.



Gambar 7. Grafik Pengujian Kendali Suhu dengan Metode PID



Gambar 8. Persen Error Sistem Kendali Suhu

B. Pengujian Warna Biji

Pengujian warna biji kopi hasil penyangraian bertujuan untuk mengetahui apakah warna hasil penyangraian normal, merata dan tidak gosong. Uji warna dilakukan dengan menggunakan alat *colormeter* yang ditembakkan ke biji kopi hasil penyangraian.

Proses pengujian warna dengan alat ukur yaitu TES 135A *colormeter* seperti pada Gambar 9. Alat ini bekerja dengan mendeteksi warna dalam ruang warna CIELAB yang merupakan ruang warna 3 dimensi dengan L*, a* dan b* merupakan sumbu-sumbunya. Hasil pembacaan pada colormeter L* menyatakan gelap terang dari biji kopi, semakin besar nilai L* maka semakin terang warna biji kopi dan semakin kecil angkanya maka semakin gelap warnanya. Range pembacaan untuk gelap hitam diwakili angka nol sedangkan untuk warna sangat terang (putih) diwakili oleh angka 100. Pembacaan a* mewakili warna merah dan hijau, nilai a* negatif mewakili hijau sedangkan a* positif mewakili merah. Pembacaan b* nilai negatif mewakili warna biru sedangkan nilai positif mewakili warna kuning.



Gambar 9. Pengujian Warna Biji Kopi Hasil Penyangraian dengan Colormeter

Proses pengukuran warna biji kopi dilakukan dengan mengambil sampel sebanyak 10 kali untuk masing-masing batch. Data pengukuran warna biji kopi hasil penyangraian dapat dilihat pada Tabel 5. 5., Tabel 5. 6., dan Tabel 5. 7. Perbedaan nilai yang kecil pada proses ini dikarenakan saat pengambilan data terdapat rongga-rongga kecil antar biji kopi yang menyebabkan bias pembacaan gelap sehingga dilakukan pengukuran sebanyak 10 kali untuk meminimalkan error dan diambil reratanya.

Berdasarkan data warna pada Tabel 2, Tabel 3, dan 4 dilakukan uji T yang bertujuan untuk mengetahui apakah warna biji kopi hasil penyangraian terdistribusi secara normal.

Tabel 2. Data Pengujian Warna Biji Kopi Sangrai Batch 1

L*	L* rata-rata	a*	a* rata-rata	b*	b* rata-rata
10,58	13,182 2	-9,74	-1,7722	2,562	0,4282
14,18		0,745		0,52	
15,2		-3,06		0,948	
14,77		-2,005		0,456	
15,57		-3,18		1,92	
11,69		0,505		-0,556	
11,45		0,79		-1,43	
13,73		-0,13		0,672	
11,47		0,125		-1,238	

Tabel 3. Data Pengujian Warna Biji Kopi Sangrai Batch 2

L*	L* rata-rata	a*	a* rata-rata	b*	b* rata-rata
18,52	18,8778	4,37	1,7917	5,962	6,7462
18,17		4,25		4,492	
18,76		1,77		9,656	
22,19		2,265		6,918	
18,23		1,43		8,02	
18,07		2,55		7,132	
19,19		0,875		5,988	
18,39		0,125		6,832	
18,38		-1,51		5,716	

Tabel 4. Data Pengujian Warna Biji Kopi Sangrai Batch 3

L*	L* rata-rata	a*	a* rata-rata	b*	b* rata-rata
16,68	18,206 7	2,525	2,6644	7,012	8,5913
17,8		2,765		7,06	
19,55		4,03		9,052	
16,96		2,37		9,574	
18,03		2		8,416	
18,45		2,875		8,188	
17,58		3,41		5,82	
19,11		2,4		10,11	
19,7		1,605		12,09	

Tabel 5. Hasil Uji Statistik Saphiro Warna Hasil Penyangraian

Uji Statistik Saphiro Wilk Warna Biji Kopi	Nilai Saviro Wilk	Kesimpulan
Keterangan	W (L*)	
Batch 1	0,8915	Normal
Batch 2	0,9046	Normal
Batch 3	0,9478	Normal

Uji normalitas dilakukan dengan uji Saphiro Wilk. Karena proses penyangraian berpengaruh signifikan terhadap nilai L* (gelap-terang) maka uji normalitas dikhususkan pada variabel L*. Hasil uji normalitas pada warna biji kopi dapat dilihat pada Tabel 5. 8. Jika hasil uji normalitas pada Tabel 5. 8 dengan taraf signifikansi 0,05, jumlah sampel 10, selang kepercayaan 95%, dan nilai $W > 0,83$ maka warna biji terdistribusi normal artinya penyangraian terjadi secara merata.

Selanjutnya dilakukan uji homogenitas untuk mengetahui bahwa data warna biji kopi sangrai homogen data dapat dilihat pada Tabel 5. 9. Jika Nilai F Hitung $< F$ Tabel maka dapat ditarik kesimpulan warna biji kopi homogen. Pada pengujian ini digunakan 10 sampel dari masing masing pasangan batch yang diuji sehingga $DF1 = 9$ dan $DF2 = 9$ didapatkan nilai F Tabel = 3,18.

Tabel 5. 1 Uji Homogenitas Warna Biji Hasil Penyangraian

Uji F (Uji Homogenitas)	Nilai Uji F	Kesimpulan
Keterangan		
Batch 1 (6 Juli 2022) dan Batch 2 (7 Juli 2022)	2,1494	<i>In The Region of Acceptance (Homogen)</i>
Batch 1 (6 Juli 2022) dan Batch 3 (7 Juli 2022)	3,0392	<i>In The Region of Acceptance (Homogen)</i>
Batch 2 (7 Juli 2022) dan Batch 3 (7 Juli 2022)	1,414	<i>In The Region of Acceptance (Homogen)</i>

Selanjutnya dilakukan uji T, karena dimensi biji kopi terdistribusi normal dan juga memiliki variance yang homogen. Hasil Uji T warna biji dan bubuk kopi hasil penyangraian dapat dilihat pada Tabel 5. 10. Untuk pengujian ini nilai T Tabel adalah 1,8331 dengan $DF = 9$, dan taraf signifikansi 0,05. Untuk Batch 2 dan 3 memiliki hasil yang tidak berbeda signifikan dikarenakan diperlakukan secara sama yakni menyangrai dalam waktu 10 menit.

Tabel 6. Uji T Warna Biji Kopi Hasil Penyangraian

Uji T - Berpasangan	Nilai T Hitung	Kesimpulan
Keterangan	L*	
Batch 1 dan 2	8,5579	$T_{Hitung} > T_{Tabel}$ (Berbeda Signifikan)
Batch 1 dan 3	7,4407	$T_{Hitung} > T_{Tabel}$ (Berbeda Signifikan)
Batch 2 dan 3	0,9991	$T_{Hitung} < T_{Tabel}$ (Tidak Berbeda Signifikan)

C. Kadar Air Biji Kopi Hasil Penyangraian

Pengujian kadar air setelah proses penyangraian dilakukan bertujuan mengetahui biji kopi hasil penyangraian memiliki kadar air sesuai SNI yaitu di bawah 5%. Pengujian ini dilakukan dengan cara melakukan pemanasan pada biji kopi selama kurang lebih 24 jam dengan alat berupa oven pada suhu kurang lebih 105°C.

Pengambilan data dilakukan dengan mengambil data massa cawan dan massa bahan basah biji kopi yang telah diroasting dengan timbangan presisi. Kemudian dilakukan pengeringan dengan oven selama 1 hari dan biji kopi serta cawan yang sudah dilakukan pemanasan disimpan ke dalam desikator untuk menjaga kontaminasi uap air dari luar setelah itu ditimbang kembali untuk diketahui massa yang baru. Hasil pengujian ini dapat dilihat pada Tabel 7. Berdasarkan Tabel 7 tampak bahwa kopi hasil penyangraian dengan metode kendali PID ini sudah memenuhi standar kadar air kopi menurut SNI yakni maksimal 5%.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Pada penelitian perancangan ini didapatkan kesimpulan bahwa kendali PID untuk pengendalian suhu biji kopi juga dapat digunakan pada mesin roaster kopi karena memiliki hasil penyangraian yang baik dengan persen error pengendalian sebesar 4,9 % dan rata-rata selisih absolut sebesar 2,73 °C. Selain itu untuk biji kopi hasil penyangraian dengan sistem kendali PID ini memiliki hasil yang cukup merata dan sebaran kematangan teruji homogen berdasarkan uji warna dan uji dimensi fisik biji kopi dan kadar air biji kopi setelah penyangraian memiliki kadar air dibawah 5% sesuai dengan SNI.

Tabel 7. Data Pengujian Kadar Air Biji Kopi Setelah Roasting

Kode Sampel	Massa Cawan (Mc)	Massa Bahan Basah (M1)	Massa Cawan + Bahan Kering (M2)	Kadar Air Biji Kopi (%)
R1	3,4991	5,1066	8,4919	2,23
R2	3,7092	5,018	8,6204	2,13
R3	3,4545	5,0127	8,3601	2,14
R4	3,4109	5,084	8,3848	2,17
R5	3,432	5,0365	8,3622	2,11
R6	3,6091	5,0947	8,5965	2,11
R7	3,411	5,095	8,3993	2,09
R8	3,4382	5,0444	8,3782	2,07
R9	3,4314	5,0272	8,3555	2,05
Rerata Kadar Air Biji Kopi (%)				2,12

Profil pengendalian biji kopi hanya bekerja secara spesifik untuk satu jenis kopi dan untuk jenis kopi yang berbeda akan diperoleh hasil yang berbeda pula dari segi warna kematangan. Hasil Uji T warna kematangan biji kopi untuk batch 2 dan 3 memiliki hasil yang tidak berbeda signifikan dikarenakan diperlakukan sama yakni menyangrai dalam waktu 10 menit, artinya pengendalian cukup konsisten.

B. Saran

Saran untuk penelitian selanjutnya yaitu memastikan bahwa kendali PID dapat mengendalikan bukaan valve dan kompor untuk besaran api yang beragam. Akan lebih baik jika ditambahkan sensor flowmeter digital sehingga variabel yang dikendalikan akan lebih spesifik dan hasil penyangraian akan lebih baik lagi. Merancang motorized ball valve yang lebih baik lagi dari segi keamanan dan ketahanan desain. Pengaduk di dalam drum mesin roaster perlu diperbesar penampangnya atau bisa juga dengan menambah kecepatan rpm motor drum menjadi sekitar 50 – 70 rpm sehingga biji kopi dapat tersangrai lebih merata.

REFERENCES

- [1] C. L. Hii and F. M. Borém, Eds., *Drying and roasting of cocoa and coffee*. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2020.
- [2] “Kemenperin: Industri Pengolahan Kopi Semakin Prospektif.” <https://kemenperin.go.id/artikel/21117/Industri-Pengolahan-Kopi-Semakin-Prospektif> (accessed Nov. 16, 2021).
- [3] “Kemenperin: Terimbas Pandemi, Neraca Dagang Kopi Olahan Masih Surplus USD 211 Juta.” <https://www.kemenperin.go.id/artikel/22036/Terimbas-Pandemi,-Neraca-Dagang-Kopi-Olahan-Masih-Surplus-USD-211-Juta> (accessed Nov. 16, 2021).

- [4] “Kenneth Davids - Home Coffee Roasting, Revised, Updated Edition_ Romance and Revival-St. Martin’s Press (2003).epub.”
- [5] D. Kho, “Pengertian Termokopel (Thermocouple) dan Prinsip Kerjanya,” *Teknik Elektronika*, Jan. 09, 2015. <http://teknikelektronika.com/pengertian-termokopel-thermocouple-dan-prinsip-kerjanya/> (accessed Nov. 16, 2021).
- [6] “Austin Hughes, Bill Drury - Electric Motors and Drives_ Fundamentals, Types and Applications-Newnes (4 Aug 2019).epub.”
- [7] “MAX6675 datasheets.” <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/73692/MAXIM/MAX6675.html> (accessed Nov. 16, 2021).
- [8] “Data Acquisition Handbook,” Massachusetts: Measurement Computing Corporation, 2008, p. 145.
- [9] K. Ogata, *Modern control engineering*, 5th ed. Boston: Prentice-Hall, 2010.
- [10] K. J. Åström, T. Hägglund, and K. J. Åström, *PID controllers*, 2nd ed. Research Triangle Park, N.C: International Society for Measurement and Control, 1995.
- [11] M. Margolis, B. Jepson, and N. R. Weldin, “Arduino Cookbook,” p. 796.
- [12] A. Trojnar and P. Ostalczyk, “Simulation of the fuel gas valve PID controller in closed loop system,” in *2018 International Interdisciplinary PhD Workshop (IIPHDW)*, Swinoujście, May 2018, pp. 13–16. doi: 10.1109/IIPHDW.2018.8388235.
- [13] P. Ramanathan, “Fuzzy Logic Controller for Temperature Regulation Process,” *Middle-East Journal of Scientific Research*, p. 5, 2014, doi: 10.5829/idosi.mejsr.2014.20.11.114162.