

PENERAPAN KONTROL PROPORSIONAL DAN PI PADA DRUM ROASTER UNTUK MENGATUR SUHU PENYANGRAIAN KOPI

Mohamad Nur Aulia R^{1*}, Budi Setiyono², dan Ajub Ajulian Zahra³

^{1,2,3}Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Semarang, Indonesia

^{*}E-mail: mohamadnurrchmn@students.undip.ac.id

Abstrak

Kapasitas dan nilai ekspor komoditas kopi Indonesia adalah yang tertinggi keempat di dunia setelah Brasil, Vietnam dan Kolombia. Dalam statistik Bank Dunia, Indonesia mengekspor sebesar 2841 ton kopi sangrai ke seluruh dunia, sedangkan menurut data Badan Pusat Statistik, kopi dalam bentuk biji kopi hijau atau berasan masih diminati oleh pasar dunia dengan kapasitas ekspor sebesar 380.173 ton pada tahun 2019. Hal ini kontras dengan kurangnya kemampuan Indonesia untuk mengekspor kopi dalam bentuk kopi sangrai, mengingat kurangnya penerapan teknologi penyangraian modern untuk memenuhi permintaan kopi sangrai dari seluruh dunia. Maka berdasarkan beberapa penelitian teknologi penyangrai kopi sebelumnya dalam makalah ini akan dirancang sebuah purwarupa sistem pengendalian suhu kopi yang merupakan penyempurnaan terbaru dari penelitian-penelitian sebelumnya. Dengan pengendalian terpusat yang dilakukan oleh Artisan RoasterScope akan mempermudah pengguna untuk mengoperasikan serta memantau tingkat kematangan kopi berdasarkan suhu akhir dan waktu penyangraian. Dalam percobaan pengaplikasian kontrol Proporsional Ziegler-Nichols memberikan hasil pengendalian suhu terbaik dengan rasio suhu tertinggi 52.1° Celsius/menit dan suhu rata-rata 140.8° Celsius. Pada percobaan dengan kontrol Proporsional-Integral Astrom-Hagglund diperoleh hasil yang berbeda pada masing-masing varietas kopi akibat kadar air yang berbeda antara *batch* satu dengan lainnya, dimana suhu rata-rata penyangraian pada kopi Robusta lebih tinggi 28.8° Celsius dari suhu kopi Arabica.

Kata kunci: penyangraian kopi, coffee roaster, kontrol proporsional, Artisan RoasterScope

Abstract

Indonesia ranks as 4th highest coffee exporter by capacity and export value in the world, behind Brazil, Vietnam and Colombia. Statistics from The World Bank shows 2841 tons caffeinated roasted bean coffee from both varieties being exported from Indonesia throughout the world, while the National Statistics Board of Indonesia reported 380.173 tons of green bean coffee exported from Indonesia within 2019. Based on previous developments of coffee roasting technology, as this undergraduate thesis will explain about a coffee roaster prototype which is an improvement from previous researches, equipped with centralized temperature control and monitoring system from Artisan roasterscope that eases the operator or user's workload to monitor the coffee beans' roast level based on roast temperature and duration. In the experimentation of Ziegler-Nichols proportional control proves to give the best result for Robusta coffee with average rate of rise at 52.1° Celsius/min and average roast temperature of 140.8° Celsius which yields 100% roast uniformity at 95 Agron roast scale. Following the addition of Astrom-Hagglund's Proportional-Integral control, the result shows a formidable difference between each coffee bean varieties due to water content difference between both varieties.

Keywords: coffee roasting, coffee roaster, proportional control, Artisan RoasterScope

1. Pendahuluan

Guna memenuhi kriteria pemeringkatan biji kopi oleh Specialty Coffee Association [1], parameter seperti suhu, waktu penyangraian dan pengamatan secara visual perlu dipertimbangkan dalam proses penyangraian. Menurut data Bank Dunia [2], Indonesia hanya mampu mengekspor 2.841 ton kopi dalam bentuk *caffeinated roasted bean* ke

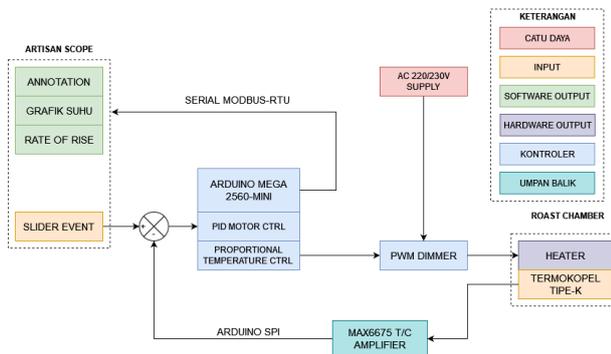
seluruh dunia pada tahun 2019. Artinya, Indonesia masih tertinggal jauh dari negara Vietnam (5.078 ton) dan negara yang bukan termasuk penghasil kopi mentah, Belanda (97.243 ton). Hal ini terjadi akibat kurangnya penerapan teknologi pascapanen dan produksi kopi yang memadai di dalam negeri sehingga terjadi ketidakmampuan dari pelaku usaha kopi untuk memasarkan produk kopi dalam bentuk *roasted bean* yang lebih mudah untuk diterima seluruh kalangan masyarakat di seluruh dunia.

Oleh karena itu, dengan pembuatan purwarupa mesin *drum roaster* dengan penambahan monitoring menggunakan *software* Artisan RoasterScope, dimana *software* Artisan memungkinkan untuk mengawasi grafik kenaikan suhu per satuan waktu dan mengendalikan tingkat panas pada pemanas secara langsung (*real-time*) yang mana suhu, tingkat kenaikan suhu per satuan waktu dan waktu penyangraian juga berpengaruh besar pada tingkat kematangan kopi. Perlu diketahui tingkat kematangan kopi yang dimaksud diukur menggunakan kertas uji warna Agtron™ Gourmet dengan mempertimbangkan persentase kopi yang gagal disangrai, baik dalam keadaan tidak tersangrai sempurna (*underroasted*) maupun gosong atau terbakar (*scorched*).

2. Metode

Sistem Kontrol Proporsional Dan Monitoring Dengan Artisan Pada Drum Roaster ini memiliki 3 bagian penting dalam perancangannya, antara lain: perancangan perangkat keras, perangkat lunak, serta perancangan sistem monitoring..

Secara umum, mekanisme kerja antar-perangkat dalam pengerjaan proyek makalah ini dapat ditunjukkan oleh diagram blok pada Gambar 1



Gambar 1. Diagram blok sistem keseluruhan

2.1. Perancangan Perangkat Keras

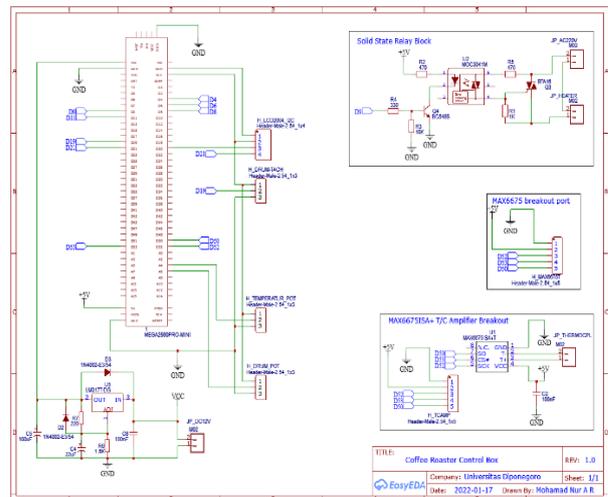
Perangkat keras yang digunakan pada penelitian ini meliputi:

1. Robotdyn Arduino Mega2560: Sistem minimum mikrokontroler berbasis AVR dengan chip Atmeg2560A-16AU
2. Termokopel Tipe-K: Sensor pengukur suhu dari -250° sampai 1000° Celsius dengan koefisien termoelektrik 41µV/°Celsius.[3]
3. *Thermocouple Amplifier* MAX6675: Konverter tegangan termoelektrik untuk termokopel tipe-K dengan resolusi 0.25° Celsius dan *cold-end compensation*. [4]
4. PWM Dimmer: Perangkat pengatur daya AC berbasis TRIAC BTA16 16 Ampere dengan sinyal kendali PWM,

5. Elemen Pemanas resistif dengan catu daya AC 230V 800 Watt.

Gambar 2 adalah skema keseluruhan dari papan *shield* Arduino, yang terdiri dari Arduino Robotdyn Mega2560-MINI, rangkaian catu daya dan sepasang rangkaian DC motor driver, yang dapat digunakan untuk mesin penyangrai jenis fluid-bed dan *sample drum roaster* atau penyangrai tipe tabung.

Pengalaman papan *shield* Arduino untuk menghubungkan kaki-kaki sensor dan aktuator dapat dilihat pada Tabel 1.



Gambar 2. Skema Rangkaian Pengendali Roaster.

Tabel 1. Pengalaman pin pada Arduino

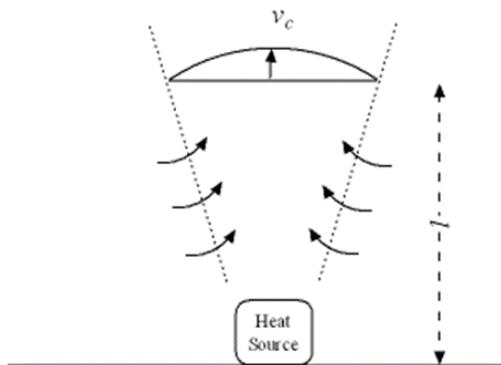
I/O	Sinyal	Jenis	Pin
Input	Potensiometer 50K	Analog	A4
Input	Potensiometer 10K	Analog	A6
Output	PWM Dimmer Input	Digital	9
Output	MAX6675 SO	Digital	50
Output	MAX6675 CS	Digital	53
Output	MAX6675 SCK	Digital	52

2.2. Perancangan Sistem Kendali

Pada sistem pemanas pada ruang tertutup seperti mesin penyangrai kopi, dimisalkan jika nilai setpoint (setpoint value atau SV) atau target suhu 180° Celsius, maka setelah sistem mencapai nilai process value (PV) 180° Celsius suhu yang terbaca akan terus meningkat melebihi setpoint akibat adanya integrator dalam. Sistem ini, menurut Iwan[5] tergolong sistem *non-self-regulating* dan dapat dianalisis menggunakan model *Integrating plus Dead Time* (IPDT).

2.2.1 Pemodelan Matematis Drum Penyangrai

Drum penyangraian kopi terdiri dari agitator atau tabung berputar, elemen pemanas, termokopel tipe K dan case (penutup tabung) Ruang ini memiliki dimensi panjang 23 cm dan diameter 18 cm, dengan tabung penyangrai berdimensi panjang 18 cm dan diameter 12 cm. Elemen pemanas berkapasitas 800 Watt dan diletakkan 1.8 cm dibawah drum penyangrai. Dengan dimensi diatas, jika idealnya drum atau tabung penyangrai terisi 33% atau sepertiga dari volume nominal tabung maka volume efektif tabung adalah 678,5 gram atau dapat dibulatkan menjadi 700 gram [6]. Gambar 3 adalah pergerakan udara konveksi pada sumber panas tunggal.



Gambar 3. Pergerakan Udara Konveksi pada Sumber Panas Tunggal [7]

Pemanasan secara konveksi dengan sumber panas tunggal mengakibatkan adanya pergerakan udara dari sumber panas secara vertikal dengan kecepatan tertentu seperti terlihat pada Gambar 3. Maka dengan daya pemanas 800 Watt dan koefisien pemanasan 1.5, kecepatan udara vertikal tersebut adalah:

$$V_{convection} = 1.5 \times \sqrt[3]{800/0.018} = 5.3 \text{ m/s} \quad (1)$$

Dari hasil perhitungan kecepatan udara konvektif adalah 5.3 m/detik, yang setara koefisien konveksi udara bergerak 30 W/m².K.

Luas penampang kopi yang terpapar oleh pemanas adalah 0.02262 m². Target suhu adalah 180° Celsius. Maka kebutuhan daya pemanas ideal adalah sebagai berikut, dalam hal pemanasan secara konvektif [7]:

$$q = \left(\frac{30W}{m^2} \cdot K\right) (0.02262m^2)(453 - 300 \text{ K}) \quad (2)$$

$$q = 103.8 \text{ W}$$

Untuk menaikkan suhu biji kopi Arabica dari 27° (suhu ruangan) sampai 189°C, dengan mensubstitusikan massa dan kalor jenis kopi Arabica yaitu 1400 J/kgK[8], jumlah kalor yang dibutuhkan untuk menaikkan suhu pada biji kopi dengan rentang suhu tersebut adalah:

$$Q = (0.7 \text{ kg})(1400 \frac{J}{kg} K)(453 - 300 \text{ K}) \quad (3)$$

$$Q = 149940 \text{ J}$$

Untuk menaikkan suhu biji kopi Robusta dari 27° (suhu ruangan) sampai 189°C, dengan mensubstitusikan massa dan kalor jenis kopi Arabica yaitu 2360 J/kgK[9], maka kalor yang dibutuhkan adalah:

$$Q = (0.7 \text{ kg})(2360 \frac{J}{kg} K)(453 - 300 \text{ K})$$

$$Q = 252756 \text{ J}$$

Mengingat 1 Joule = 1 Watt-detik maka waktu (prediksi) yang dibutuhkan heater 800 W untuk memanaskan kopi arabica adalah :

$$t_{Arabica} = \frac{Q}{W} = \frac{149940}{103.8} = 1444.5 \text{ detik} \quad (4)$$

Unuk kopi Robusta waktu yang dibutuhkan adalah:

$$t_{Robusta} = \frac{Q}{W} = \frac{252756}{103.8} = 2435 \text{ detik}$$

2.2.2 Pengujian Bump-Test Pengendalian Suhu

Berdasarkan hasil pengujian bump-test pada sistem pengendalian suhu open-loop maka didapatkan kedua parameter sistem IPDT yaitu gain proses integratif K*:

$$K^* = \frac{\Delta PV/\Delta t}{\Delta CO} = \frac{(80.5-31.5)/101}{128} = 0.00379 \quad (5)$$

Keterlambatan respon sistem terhadap perubahan masukan kontroler (L) adalah:

$$L = 45 \text{ detik} \quad (6)$$

Dengan kedua parameter diatas maka fungsi alih sistem keseluruhan adalah:

$$H(s) = \frac{PV(s)}{CO(s)} = \frac{0.00379}{s} e^{-45s} \quad (7)$$

2.2.3 Penalaan Kontroler Proporsional dan PI model sistem IPDT

Maka pada metode penalaan parameter Kp Ziegler-Nichols ultimate-gain, dengan mensubstitusikan nilai L dan K* pada tabel 2 didapatkan nilai Kp yang ideal adalah:

$$Kp = \frac{0.78}{45 \times (3.79 \times 10^{-3})} = 4.57 \quad (8)$$

Untuk metode pengecilan Kp manual adalah:

$$Kp = 0.5 \times \frac{0.78}{45 \times (3.79 \times 10^{-3})} = 2.29 \quad (9)$$

Pada simulasi program pengendalian suhu dengan kontroler PI dengan Autodesk Tinkercad ditemukan hanya kontroler PI Astrom-Hagglund Regulator tidak menyebabkan kontroler terkunci pada nilai maksimal. Untuk penggunaan kontrol PI Astrom-Hagglund Regulator adalah:

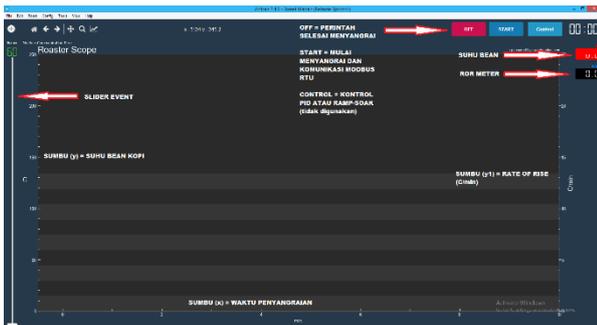
$$Kp = \frac{0.63}{45 \times (3.79 \times 10^{-3})} = 3.69 \quad (10)$$

$$Ki = \frac{Kp}{3.2 \times 45} = 0.03 \quad (11)$$

2.3. Perancangan Sistem Monitoring

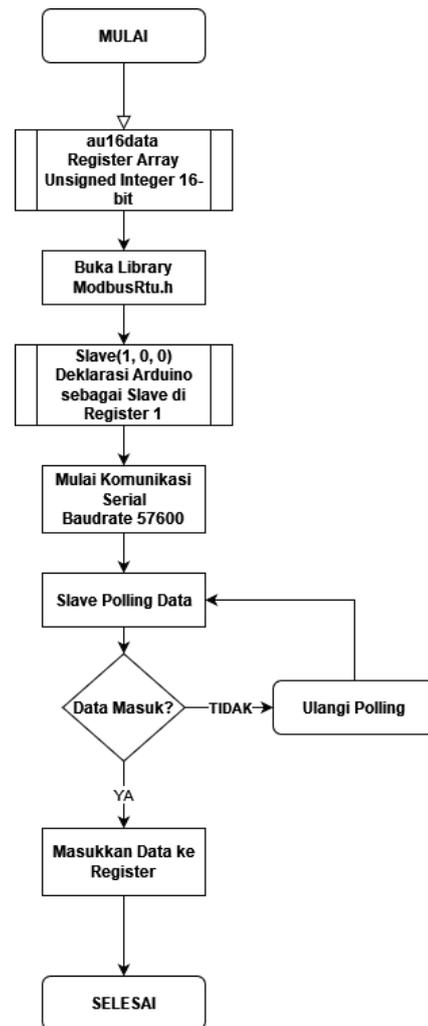
Sistem monitoring menggunakan *software* Artisan RoasterScope pada penyangrai kopi agar operator dapat memantau dan mengendalikan mesin penyangrai secara terpusat pada komputer menggunakan fitur *slider event*. Sistem monitoring menggunakan Artisan juga dapat dilakukan pengendalian setpoint (SV) suhu penyangraian kopi melalui fitur *slider* pada Artisan. Ketika diaktifkan, *slider event* ini akan muncul seketika setelah muncul perintah ON atau START pada Artisan seperti terlihat pada Gambar 4.

Komunikasi antara perangkat penyangrai dengan komputer dapat dilakukan melalui protokol Serial Modbus-RTU dengan pola kerja yang dijelaskan oleh diagram alir pada Gambar 5[10].



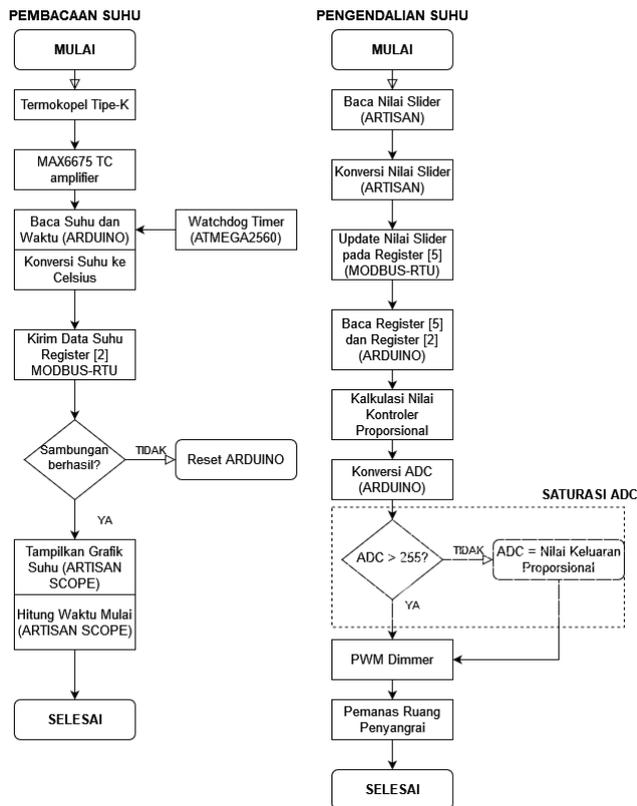
Gambar 4. Tampilan awal Artisan RoasterScope

RTU (*Remote Terminal Unit*) adalah metode transmisi serial yang bersifat *default* pada Modbus, dengan jumlah data sebanyak 11 bit. Ada 8-bit kosong yang dapat diisi oleh data biner maupun heksadesimal, sisanya adalah untuk *parity*, *stopbits* dan *Cyclic Redundancy Check (CRC) bit* [11].



Gambar 5. Diagram alir komunikasi Modbus-RTU pada Artisan RoasterScope

Dalam jaringan komunikasi Modbus, hanya terdapat satu perangkat master dengan satu atau lebih perangkat slave. Komunikasi *broadcast* atau pengalamatan bersifat satu arah dimana *master* mengirimkan perintah (*query*) kepada satu atau seluruh perangkat *slave*, sedangkan *unicast* memungkinkan untuk *master* untuk mengirimkan data *query* kepada *slave*, kemudian *slave* akan memproses data *query* kemudian memberikan respon kepada perangkat *master* seperti yang diterapkan pada penelitian ini. Gambar 6 menjelaskan tentang aliran data komunikasi Modbus-RTU pada Artisan dengan Arduino sebagai *slave*.



Gambar 6. Diagram alir transfer data pada Serial Modbus-RTU

dengan MAX6675 diberi nama TC dan multitester Sanwa PC-7000 (perangkat referensi) diberi nama Ref.

Tabel 2. Grafik kalibrasi termokopel tipe-K

Setpoint °C	TC °C	Ref °C	Error °C	Error %
30	30.2	33.3	3.1	9.33
35	35.2	38.1	2.9	7.60
40	40.5	42.3	1.8	4.25
45	45.2	51.5	6.3	12.2
50	50.2	61.1	10.9	17.8
55	55.2	56.9	1.7	2.99
60	60.0	62.3	2.3	3.70
65	65.2	67.5	2.3	3.40
70	70.5	74.7	4.2	5.62
75	75.5	78.9	3.4	4.31
80	80.7	83.0	2.3	2.77
85	85.5	89.1	4.4	4.94
90	90.7	96.0	5.3	5.52
95	95.5	102.7	7.2	7.01
100	113.2	100.2	13.0	11.5

3. Hasil dan Pembahasan

Pengujian penyangraian menggunakan dua varietas kopi yaitu Arabica Kwadungan dan Robusta Temanggung. Dalam pengujian ini suhu setpoint adalah 180° Celsius dan sampel kopi yang digunakan adalah 0.7 Kg untuk seluruh pengujian penyangraian.

Kriteria kematangan yang dipakai adalah dengan penelitian Maulina dkk.[12] dan Rao[13] nilai skala Agtron Gourmet tidak boleh lebih dari 120 (tidak matang) atau kurang dari 23 (gosong).

Kalibrasi termokopel dengan perangkat referensi dilakukan sebelum pengujian penyangraian kopi.

3.1. Kalibrasi Termokopel MAX6675 dengan Referensi Sanwa PC-7000

Sebelum melakukan perangkat pengukur suhu termokopel tipe-K dengan MAX6675 perlu dilakukan perbandingan terhadap perangkat referensi yaitu multitester Sanwa PC-7000 dengan termokopel tipe-K. Spesifikasi perangkat referensi adalah resolusi 0.1° Celsius dengan error sebesar 0.3±0.20 % [14], sementara perangkat termokopel tipe-K dengan MAX6675 resolusi 0.25° Celsius dengan error sebesar 0.029 %. Dalam Tabel 2 perangkat termokopel

Pada Tabel 2 terdapat perbedaan suhu diatas 10% pada interval 30°, 45°, 50° dan 100° Celsius yang menandakan salah satu perangkat memiliki sistem kalibrasi internal (*auto-ranging and calibration*) masing-masing. Gambar 7 menunjukkan fluktuasi selisih pengukuran antara termokopel dengan referensi Sanwa PC-7000.

Dari Tabel 2 dapat disimpulkan persamaan kalibrasi untuk termokopel tipe K pada suhu 30° sampai 50° Celsius adalah:

$$Error\% = \frac{Error_{30} + Error_{35} + \dots + Error_{50}}{5} \quad (12)$$

$$Error\% = 10.24\%$$

$$PV_1 = PV_{MAX6675} + 0.1024PV_{MAX6675} \quad (13)$$

Untuk suhu 51° – 75° Celsius:

$$Error\% = \frac{Error_{55} + Error_{60} + \dots + Error_{75}}{5} \quad (14)$$

$$Error\% = 4.0\%$$

$$PV_2 = PV_{MAX6675} + 0.04PV_{MAX6675} \quad (15)$$

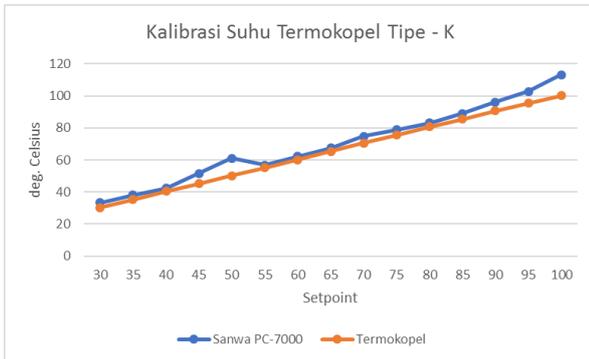
Untuk suhu diatas 76° Celsius

$$Error\% = \frac{Error_{80} + Error_{85} + \dots + Error_{100}}{5} \quad (16)$$

$$Error\% = 6.35\%$$

$$PV_3 = PV_{MAX6675} + 0.0635PV_{MAX6675} \quad (17)$$

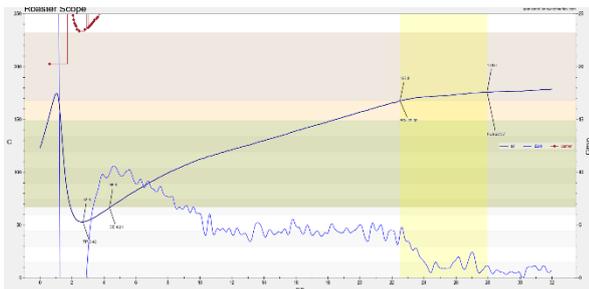
Gambar 7 memperlihatkan grafik kalibrasi suhu termokopel tipe-K.



Gambar 7. Grafik kalibrasi suhu termokopel tipe-K

3.2. Pengaruh Tuning Kontroler terhadap Rate of Rise (ROR) dan Suhu Penyangraian

Pengujian dengan biji kopi Robusta Temanggung dengan waktu penyangraian 30 menit, kecepatan motor konstan dikendalikan oleh PID sebesar 80 RPM. Gambar 8, Gambar 9 dan Gambar 10 menunjukkan grafik penyangraian kopi robusta dengan kontrol proporsional manual, Ziegler-nichols dan PI astrom-hagglund.



Gambar 8. Grafik penyangraian kopi Robusta dengan kontrol Proporsional Manual



Gambar 9. Grafik penyangraian kopi Robusta dengan kontrol Proporsional Ziegler-Nichols

Penerapan nilai Kp metode Ziegler-Nichols pada Gambar 9 dapat memberikan respon suhu *charge* yang lebih baik dengan ROR 52.0 °C/menit sementara pada Gambar 8 metode pengecilan Kp manual nilai ROR adalah 51.2 °C/menit. Hal ini sangat mempengaruhi proses penyangraian selanjutnya, yaitu pada fase setelah *turning point* pada menit ke-2. Dapat diamati pula meskipun rata-rata ROR dari penggunaan nilai Kp Ziegler-Nichols lebih

rendah daripada Kp penalaan manual, rata-rata suhu sangrai kopi dengan nilai Kp Ziegler-Nichols adalah 6.2° C lebih tinggi daripada penerapan nilai Kp manual namun rata-rata ROR lebih rendah 0.1° C/menit. Dapat disimpulkan bahwa penggunaan nilai Kp penalaan Ziegler-Nichols tidak membuat ROR meningkat pada proses penyangraian kopi robusta, melainkan meningkatkan suhu rata-rata penyangraian.



Gambar 10. Grafik penyangraian kopi Robusta dengan kontrol PI Astrom-Hagglund

Penerapan kontrol PI Astrom-Hagglund Regulator pada Gambar 10 menunjukkan respon *charge* terbaik dengan ROR 55.1 °C/menit dan rata-rata ROR 7.9° C/menit. Rata-rata suhu penyangraian meningkat 0.1° Celsius dari metode Ziegler-Nichols dengan suhu puncak 192.5° Celsius.

Dapat disimpulkan bahwa penggunaan kontroler PI Astro-Hagglund Regulator membuat ROR dan suhu rata-rata meningkat pada proses penyangraian kopi robusta akibat penambahan kontrol integral pada sistem IPDT yang memiliki integral dalam sistem itu sendiri. Dari ketiga pengujian dengan kopi robusta, suhu 180 Celsius dicapai pada menit ke-24, yang mendahului hasil prediksi waktu penyangraian yaitu 2435 detik atau 40 menit 36 detik.

Tabel 3 mengulas tentang masing-masing parameter pengendalian suhu berdasarkan variasi penalaan kontroler. Dari seluruh percobaan penyangraian kopi Robusta terlihat seluruh kopi hasil pengujian mencapai suhu *setpoint* mendahului prediksi waktu penyangraian.

Tabel 3. Grafik penyangraian kopi Robusta dengan kontrol Proporsional Manual

Tuning	ROR° C/min	Suhu °C	Dry End (m:d)	1 st Crack (m:d)
Manual	7.2	134.6	8: 46	27: 57
ZN	7.1	140.8	7: 54	23: 30
PI	7.9	140.9	8: 15	24: 12

Salah satu keuntungan penggunaan nilai Kp Ziegler-Nichols adalah untuk memajukan *waktu first crack* sehingga kopi tidak mengalami *overdevelopment* atau bahkan gosong.

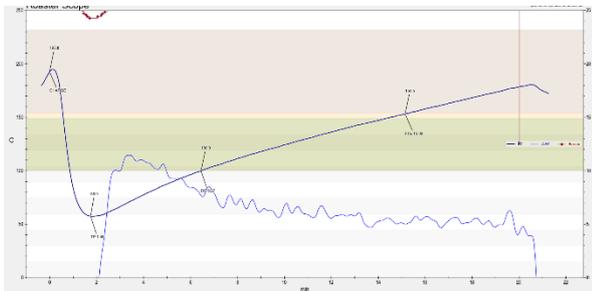
Pengujian dengan biji kopi Arabica Kwadungan Temanggung dilakukan dengan waktu penyangraian 20

menit, kecepatan motor konstan dikendalikan oleh PID sebesar 80 RPM. Gambar 11 merupakan grafik penyangraian kopi Arabica dengan kontrol Proporsional Manual.



Gambar 11. Grafik penyangraian kopi Arabica dengan kontrol Proporsional Manual

Gambar 12 merupakan grafik penyangraian kopi Arabica dengan kontrol Proporsional Ziegler-Nichols.

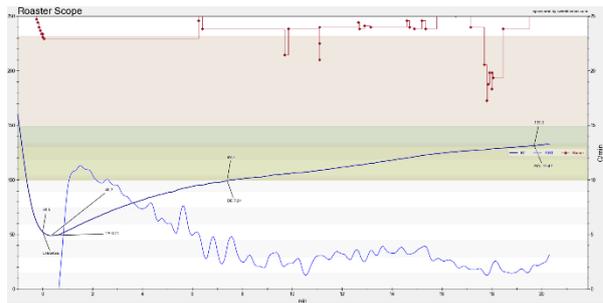


Gambar 12. Grafik penyangraian kopi Arabica dengan kontrol Proporsional Ziegler-Nichols

Penerapan nilai Kp metode Ziegler-Nichols pada Gambar 12 dapat memberikan respon suhu *charge* yang lebih baik dengan ROR 52.0 °C/menit namun rata-rata ROR adalah 9.6 °C/menit. Dapat diamati pula suhu *bean* rata-rata dari penggunaan nilai Kp Ziegler-Nichols lebih rendah daripada Kp penalaan manual pada 122.8° Celsius dengan suhu puncak 164.1° Celsius, sedangkan pada penerapan Kp penalaan manual suhu rata-rata 130.4° Celsius dengan suhu puncak 178.5° Celsius seperti yang ditunjukkan pada Gambar 11.

Dapat disimpulkan bahwa penggunaan nilai Kp penalaan Ziegler-Nichols tidak berpengaruh pada peningkatan ROR, suhu rata-rata dan suhu puncak pada proses penyangraian kopi arabica, melainkan terdapat faktor lain yaitu kelembapan kopi yang membuat suhu dan ROR menjadi rendah akibat adanya efek pendinginan dari uap air berlebih dari biji kopi.

Gambar 13 merupakan grafik penyangraian kopi Arabica dengan kontrol PI Astrom-Hagglund



Gambar 13. Grafik penyangraian kopi Arabica dengan kontrol PI Astrom-Hagglund

Penerapan kontrol PI Astrom-Hagglund Regulator pada Gambar 13 menunjukkan respon *charge* terendah dengan ROR 25.1 °C/menit dan rata-rata ROR 6.3° C/menit. Rata-rata suhu penyangraian menurun sebesar 10° Celsius dari penalaan Ziegler-Nichols dengan suhu 112.2° Celsius. Dapat disimpulkan bahwa penggunaan kontroler PI Astro-Hagglund Regulator membuat ROR dan suhu rata-rata meningkat pada proses penyangraian kopi robusta akibat penambahan kontrol integral pada sistem IPDT yang memiliki integral dalam sistem itu sendiri.

Tabel 4 mengulas tentang masing-masing parameter pengendalian suhu berdasarkan variasi penalaan kontroler. Pada Tabel 4 terlihat pengujian kontrol Proporsional manual dan PI Astrom-Hagglund mendekati prediksi waktu untuk mencapai *first crack*, yang artinya suhu kopi aktual pada embrio melebihi 180° Celsius yaitu pada 24 menit 3 detik atau 1444.5 detik, sementara pada metode manual waktu *first crack* terlambat 3 menit 54 detik dari prediksi.

Tabel 4. Grafik penyangraian kopi Robusta dengan kontrol Proporsional Manual

Tuning	ROR° C/min	Suhu °C	Dry End	1 st Crack
Manual	10.1	130.4	6: 13	18: 18
ZN	9.6	122.8	6: 25	15: 10
PI	6.3	112.1	7: 24	19: 42

3.3. Pengaruh *Tuning* Kontroler terhadap Tingkat Kematangan Kopi

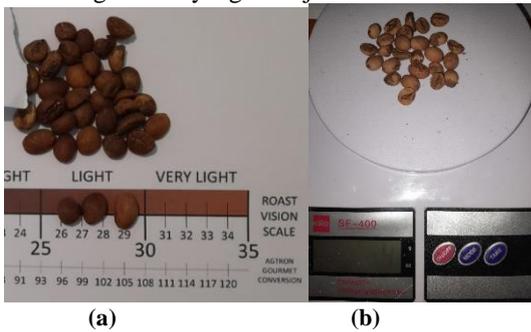
Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi penalaan parameter kontroler terhadap tingkat kematangan dan keseragaman kematangan kopi. Hal ini diperoleh dari perhitungan persentase kematangan kopi dari total massa *batch* sebagai berikut, jika diketahui massa kopi dalam gram adalah 700 gram:

$$\%M_{seragam} = \frac{700 - (M_{scorched} + M_{underroast})}{700} \quad (16)$$

dimana $M_{scorched}$ adalah massa kopi yang gosong (nilai skala Agtron kurang dari 23) dan $M_{underroast}$ adalah massa

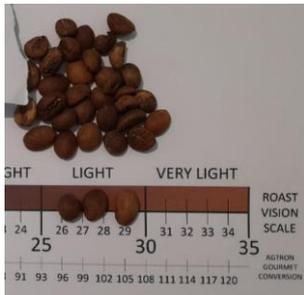
kopi yang tidak tersangrai sempurna (nilai Agtron lebih dari 120).

Pada penyangraian kopi robusta, dengan menyortir masing-masing batch kopi dari pengujian penyangraian terdapat massa kopi yang gagal disangrai atau tidak matang sebanyak 4 gram untuk penalaan Kp manual yang ditampilkan pada Gambar 14 dan 3 gram untuk penerapan kontrol PI Astrom-Hagglund pada Gambar 16 dengan menyortir Hasil keseragaman kematangan terbaik diperoleh pada penyangraian kopi dengan metode kontrol proporsional Ziegler-Nichols dengan keseragaman 100% pada skala Agtron 95 yang ditunjukkan oleh Gambar 15.

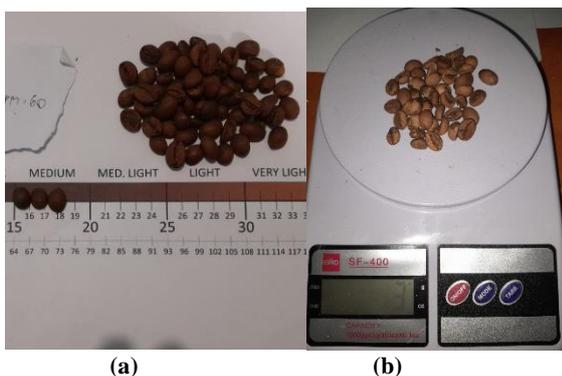


Gambar 14. Hasil pengujian kematangan kopi Robusta metode Proporsional manual

- (a) Uji tingkat kematangan dengan skala warna Agtron
- (b) Uji massa kopi yang gagal tersangrai sebanyak 4 gram



Gambar 15. Hasil pengujian kematangan kopi Arabica metode Proporsional Ziegler-Nichols



Gambar 16. Grafik penyangraian kopi Arabica dengan kontrol PI Astrom-Hagglund

- (a) Uji tingkat kematangan dengan skala warna Agtron
- (b) Uji massa kopi yang gagal tersangrai sebanyak 3 gram

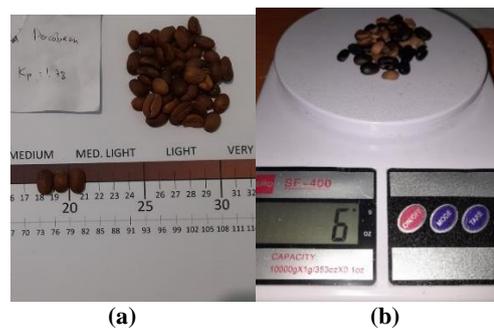
Pada Tabel 5 terdapat hasil pengujian kematangan kopi menggunakan skala Agtron Gourmet pada kopi Robusta beserta persentasi keseragaman kematangan dengan menyortir kemudian menimbang massa biji kopi yang memiliki kriteria tidak matang dan scorched.

Tabel 5. Data hasil penyangraian kopi Robusta

Tuning	Skala Agtron	Keterangan Roast	Keseragaman %
Manual	96	Very Light	99.43%
ZN	95	Light	100%
PI	67	Medium	99.57%

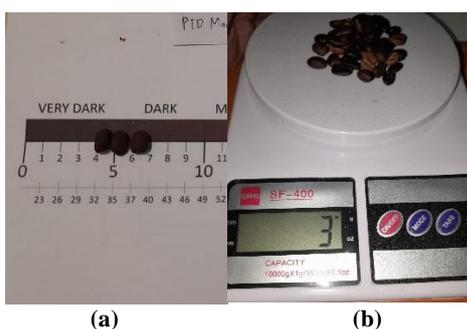
Pada penyangraian kopi arabica, dengan menyortir masing-masing batch kopi dari pengujian penyangraian terdapat massa kopi yang gagal disangrai atau tidak matang sebanyak 6 gram untuk penalaan Kp manual terlihat pada Gambar 17, 3 gram untuk penalaan Kp Ziegler-Nichols seperti terlihat pada Gambar 18 dan 8 gram untuk penerapan kontrol PI Astrom-Hagglund pada Gambar 19.

Hasil keseragaman kematangan terbaik diperoleh pada penyangraian kopi dengan metode kontrol proporsional Ziegler-Nichols dengan keseragaman 99.57% pada skala Agtron 35.

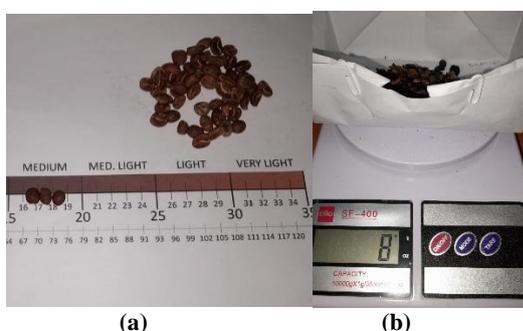


Gambar 17. Grafik penyangraian kopi Arabica dengan kontrol PI Astrom-Hagglund

- (a) Uji tingkat kematangan dengan skala warna Agtron
- (b) Uji massa kopi yang gagal tersangrai sebanyak 6 gram



Gambar 18. Grafik penyangraian kopi Arabica dengan kontrol PI Astrom-Hagglund
 (a) Uji tingkat kematangan dengan skala warna Agtron
 (b) Uji massa kopi yang gagal tersangrai sebanyak 3 gram



Gambar 19. Grafik penyangraian kopi Arabica dengan kontrol PI Astrom-Hagglund
 (a) Uji tingkat kematangan dengan skala warna Agtron
 (b) Uji massa kopi yang gagal tersangrai

Pada Tabel 6 terdapat hasil pengujian kematangan kopi menggunakan skala Agtron Gourmet pada kopi Arabica beserta persentasi keseragaman kematangan.

Tuning	Skala Agtron	Keterangan Roast	Keseragaman %
Manual	79	Medium Light	99.14%
ZN	35	Dark	99.57%
PI	73	Medium	98.85%

4. Kesimpulan

Penerapan tiga jenis metode kontrol yaitu kontrol Proporsional penalaan manual, penalaan Ziegler-Nichols dan PI Astrom-Hagglund Regulator memberikan pengaruh berupa peningkatan suhu rata-rata dan suhu puncak pada penyangraian kopi robusta dengan suhu rata-rata secara urut adalah 134.6°, 140.8° dan 140.9° Celsius dan suhu

uncak 176.7°, 183.6° dan 192.5° Celsius. Kenaikan suhu tersebut berpengaruh pada tingkat kematangan kopi yang ditandai dengan nilai skala warna Agtron yang semakin kecil dari 96, 95 kemudian 67.

Pergeseran skala Agtron ini juga berlaku pada kopi arabica pada penalaan manual dan Ziegler-Nichols, namun pada kontrol PI Astrom-Hagglund Regulator tingkat kematangan kembali pada skala Agtron 73 akibat perbedaan kadar air pada batch kopi Arabica. Suhu rata-rata juga menurun dari 130.4°, 122.8° kemudian 112.1° Celsius Dapat disimpulkan pada penerapan metode kontrol yang berbeda hanya berpengaruh signifikan pada suhu rata-rata dan suhu puncak penyangraian yang nantinya berpengaruh pada pergeseran skala Agtron. Besar ROR, waktu *dry end* dan waktu *first crack* ditentukan oleh kadar air dalam biji kopi itu sendiri tanpa pengaruh dari perbedaan penerapan metode kontrol dan tidak dapat diprediksi secara matematis. Penerapan *software* Artisan RoasterScope memungkinkan pengguna untuk menggunakan profil penyangraian kopi sebelumnya yang sudah tersimpan.

Penyempurnaan penelitian dapat dilakukan dengan penambahan metode kontrol *autotuning* serta melakukan pemeriksaan kadar air batch kopi mentah terlebih dahulu sebelum disangrai.

Referensi

- [1] *Protocols and Best Practices for Golden Cup Standard*, Specialty Coffee Association (SCA) of United Kingdom, Chelmsford, Essex CM3 4HF, 2018
- [2] WIST World Bank, Washington D.C, USA. *Coffee; roasted, not decaffeinated exports by country in 2019* (2019) [Online]. Tersedia : <https://wits.worldbank.org/trade/comtrade/en/country/ALL/year/2019/tradeflow/Exports/partner/WLD/product/090121..>
- [3] *NIST ITS-90 K-Type Thermocouple Database*. NIST Standard No. ITS-90 Mon. 175, 1993
- [4] *MAX6675ISA+ Cold Junction Compensated K-Thermocouple to Digital Converter*. Maxim Integrated Inc., San Jose, California, Juni 2021
- [5] I. Setiawan, *Kontrol PID untuk Industri*. Jakarta: Elex Media Komputindo, 2008.
- [6] A. Kusnandar, A. Ardianto, *Rahasia Canda: Teknik Penyangraian Kopi*. Jember: Pusat Penelitian Kopi dan Kakao (PUSLITKOKA), 2020.
- [7] Engineering ToolBox, (2003). Convective Heat Transfer. [online] Available: https://www.engineeringtoolbox.com/convective-heat-transfer-d_430.html [Accessed 5 November 2022].
- [8] V. Strezov, J.T. Evans, "Thermal Analysis of the Reactions and Kinetics of Green Coffee During Roasting," *IOSR Journal of Engineering*, vol. 8, 2005, eISSN: 1532-2386.

- [9] P. Casanova, J.C.C Campos *et al.*, “Thermal properties of Conilon coffee fruits,” *International Journal of Food Properties*, vol. 3, no.11, November 2013, eISSN: 2250-3021, hal. 31-33.
- [10] M. D Fahmi. "Sistem Monitoring Dan Kendali Proses Sampel Roasting Menggunakan Software Artisan Roaster Scope", Laporan Tugas Akhir, Departemen Teknik Elektro, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta, 2021.
- [11] A. Tiyono, Sudjadi & I. Setiawan, “Sistem Telekontrol Scada Dengan Fungsi Dasar Modbus Menggunakan Mikrokontroler AT89S51 Dan Komunikasi Serial Rs485,” *Jurnal GEMA TEKNOLOGI UNDIP*, vol. 5, no. 1, Apr. 2007, Art. ID. 11724343.
- [12] H. Maulina, Syafrandi & M. Idkham. “Uji Kinerja Mesin Penyangrai Kopi Dengan Menggunakan Sumber Elemen Pemanas Listrik (*Heater*) dan Tenaga Penggerak Motor Listrik,” *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Pertanian UNSYIAH*, vol. 7, no. 1, hal.532-546, Feb. 2022.
- [13] S. Rao, *The Coffee Roasters’ Companion*. Canada, Toronto: Scott Rao Pub. Inc., 2014 [Online]. Tersedia: <https://www.scottrao.com/the-coffee-roasters-companion>.
- [14] *Sanwa-DMM PC-7000 Users’ Instruction Manual*. Sanwa Electric Instruments Co.LTD, Tokyo, Japan, November 2020.