

Penyangrai Biji Kopi Otomatis Untuk Rumah Tinggal

Eryc Tri Juni S, Ponco Siwindarto, dan Eka Maulana

Abstrak—*Coffee roasting* (penyangraian) merupakan salah satu proses terpenting dalam pengolahan biji kopi. Sehingga dibutuhkan sebuah mesin *coffee roaster* otomatis yang mampu menunjang proses *home roasting* berdasarkan *profile* yang sudah ditentukan. Pada dasarnya *coffee roaster* ini adalah sebuah alat pemanas yang suhunya diatur mengikuti kaidah *roasting profile* dimana proses pemanasan menggunakan *hot air* yang dihasilkan oleh elemen pemanas elektrik dan ditiup oleh sebuah kipas angin dibawahnya. Dengan mengatur kecepatan motor kipas angin, maka suhu udara panas akan dapat diatur juga. Metode PID dipilih sebagai metode kontrol agar sistem memiliki respon yang optimal berdasarkan karakteristik beban yang diatur. Lalu, untuk memudahkan pengguna dalam memantau nilai suhu dan informasi mengenai fase kondisi *roasting*, parameter tersebut akan ditampilkan lewat LCD display. Dari hasil perancangan dan pembuatan didapatkan hasil pembacaan sensor suhu *thermocouple* memiliki kesalahan 0,19 %. Pada tegangan pemicuan MOSFET IRF540N maksimal yakni 10V didapatkan simpangan error maskimal sebesar 0,52V atau 5,2 %. Untuk sistem kontrol PID dengan nilai K_p , K_i dan K_d dengan berturut – turut adalah 74, 52 dan 5. Diperoleh nilai waktu naik (t_r) = 90,9 detik, waktu puncak (t_p) = 98,7 detik, Waktu penetapan (t_s) = 104,1 detik. Maksimum overshoot (M_p) = 2,03 % pada *setpoint* 150° C.

Index Terms— Penyangrai biji kopi otomatis, *Thermocouple*, Sistem kontrol PID.

I. PENDAHULUAN

Minuman kopi adalah salah satu minuman yang paling populer yang pernah ada dalam sejarah peradaban umat manusia. Sejalan dengan perkembangan pola konsumsi manusia, minuman kopi tidak lagi sekedar untuk kebutuhan konsumsi. Melainkan telah bertransformasi menjadi bagian dari gaya hidup. Sehingga, berkembang pula proses pengolahan dan sarat penyajian dari minuman kopi dengan tujuan mengoptimalkan kualitas serta cita rasa unik dari masing – masing *varietas* biji kopi.

Salah satu proses terpenting dalam pengolahan biji kopi dikenal dengan nama *coffee roasting* (penyangraian). Sehingga, latar belakang itulah yang mendasari penulis untuk merancang sebuah mesin *coffee roaster* otomatis berbasis

mikrokontroler yang dapat menunjang proses *home roasting*. Dimana diharapkan, alat ini mampu melakukan proses *roasting* yang sinergis dengan parameter maupun kaidah – kaidah *roast profile* yang dapat menghasilkan *roasted coffee* dengan kualitas unggul.

II. METODOLOGI PENELITIAN

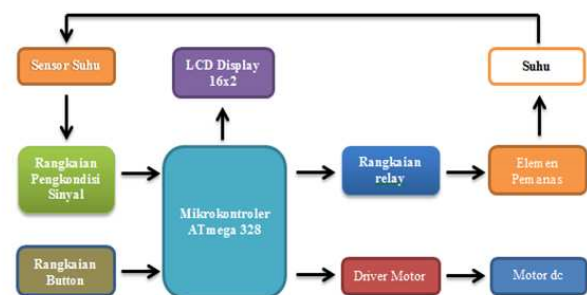
Penyusunan skripsi ini didasarkan pada masalah yang bersifat aplikatif yang diwujudkan dalam bentuk *prototype*, yaitu perencanaan dan perealisasiian alat agar dapat menampilkan kinerja sesuai dengan yang direncanakan dengan mengacu pada rumusan masalah. Data dan spesifikasi komponen yang digunakan dalam perencanaan merupakan data sekunder yang diambil dari buku data komponen elektronika. Pemilihan komponen berdasarkan perencanaan dan disesuaikan dengan komponen yang ada di pasaran.

Langkah-langkah yang dilakukan untuk merealisasiikan alat yang akan dibuat secara umum adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur
2. Penentuan spesifikasi alat
3. Perancangan dan perealisasiian alat
4. Pengujian Alat

III. PERANCANGAN DAN PEMBUATAN ALAT

A. Blok Diagram Sistem Penyangrai Biji Kopi Otomatis



Gb. 1 Diagram Blok Sistem Penyangrai Biji Kopi Otomatis

Gb.1 menunjukkan diagram blok sistem secara keseluruhan. Prinsip kerja sistem ini adalah Proses dimulai ketika pertama kali alat dinyalakan, LCD display akan menampilkan pesan selamat datang dan menunggu pengguna untuk menekan tombol. Selanjutnya setelah tombol ditekan, kipas angin akan menyala tetapi tidak dengan elemen pemanasnya. Lalu, pengguna perlu untuk mengatur kecepatan motor kipas angin melalui sebuah potensiometer dan tidak

Eryc Tri Juni S adalah kandidat Sarjana Teknik Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya (Telp./mobile: +62-85640484800; e-mail: neo_nietzsche@yahoo.com).

Ir. Ponco Siwindarto, M.Eng., Sc. dan Eka Maulana, ST., M.Eng adalah staf pengajar Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya (e-mail: ponco@ub.ac.id; ekamaulana@gmail.com).

lama kemudian biji kopi akan terlihat mulai bergerak. Ketika tombol ditekan lagi, yang terjadi ialah elemen pemanas akan menyala dan proses roasting telah dimulai.

Sensor suhu akan mengukur nilai suhu dan nilai tersebut akan dikirimkan ke unit mikrokontroler. Data tersebut akan diolah dan digunakan dalam proses pengaturan motor kipas angin yang disesuaikan dengan nilai *set point*. Dengan menaikkan dan menurunkan kecepatan motor kipas angin, diharapkan dapat mengatur nilai suhu sesuai dengan yang diinginkan. Jika biji kopi mendapat lebih dari 3 derajat diatas nilai set point, maka elemen pemanas akan dimatikan sehingga suhu dapat menurun secara drastis. Nilai set point juga akan senantiasa diperbaharui sejalan dengan nilai *roasting profile* yang diatur dalam program. Secara singkat, kaidah roasting profile yang diinginkan adalah sebagai berikut :

Tahap 1: Suhu ditingkatkan hingga mencapai 150°C

Tahap 2: Nilai suhu 150°C dijaga dalam kurun waktu 60 detik

Tahap 3: Suhu ditingkatkan hingga 190°C selama 180 detik (13,3°C/menit)

Tahap 4: Nilai suhu 190°C dijaga selama 60 detik

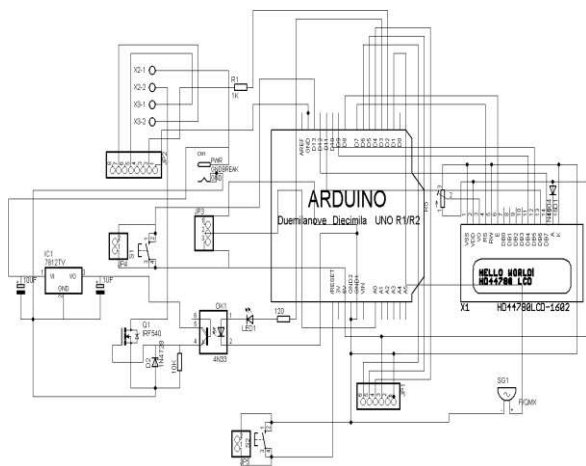
Tahap 5: Suhu kembali ditingkatkan dengan kenaikan 3°C/menit hingga mencapai suhu maksimal (205°C)

Tahap 6: Proses pendinginan hingga suhu mencapai 40°C

B. Perancangan Perangkat Keras Penyangrai Biji Kopi Otomatis

Perancangan perangkat keras penyangrai biji kopi otomatis terbagi menjadi beberapa bagian, antara lain:

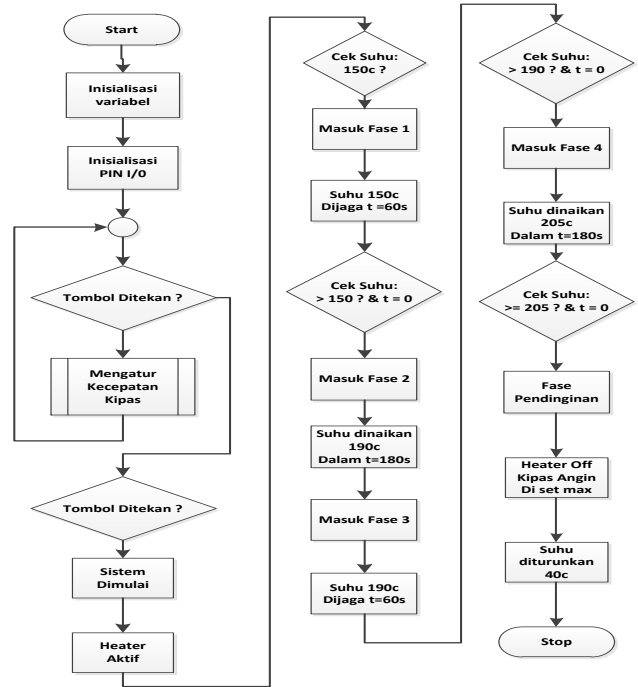
- 1) Perancangan driver pengontrol kecepatan putaran kipas angin.
- 2) Perancangan antarmuka sensor suhu *thermocouple*
- 3) Perancangan sistem minimum mikrokontroler ATMEGA 328
- 4) Perancangan antarmuka LCD *display*.
- 5) Perancangan rangkaian untuk tombol.



Gb. 2 Rangkaian keseluruhan Sistem Penyangrai Biji Kopi Otomatis

C. Perancangan Perangkat Lunak Penyangrai Biji Kopi Otomatis

Perancangan perangkat lunak penyangrai biji kopi otomatis dibuat dengan Arduino IDE 0.22.



Gb. 3 Diagram alir program utama penyangrai biji kopi Otomatis

IV. HASIL PENGUJIAN DAN PEMBAHASAN

Pengujian dilakukan per blok untuk dapat mengetahui permasalahan di tiap blok agar proses *troubleshooting* lebih mudah dilakukan.

A. Pengujian Sensor Suhu Thermocouple Melalui IC AD595

Pengujian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja sensor suhu *thermocouple* yang dihubungkan dengan IC AD595 sehingga keluaran yang dihasilkan dapat sesuai dengan karakteristik pada *datasheet* dan memiliki nilai yang *actual*. Hasil pengujian output IC AD595 tertera dalam tabel I.

TABEL I
HASIL PENGUJIAN OUTPUT IC AD595

Suhu Thermocouple (°C)	Output IC AD595 (mV)	Bit ADC
25	250	51
30	300	61
40	401	82
50	503	102
60	605	123
80	810	164
100	1015	205
120	1219	246
140	1420	286

160	1620	327
180	1817	368
200	2015	409
220	2213	450
240	2413	491
260	2614	532
280	2817	573

Namun diperlukan pengujian thermocouple untuk kalibrasi. Kalibrasi dilakukan dengan membandingkan nilai suhu keluaran sensor *thermocouple* dengan modul sensor suhu PT-100 karena diasumsikan bahwa modul sensor suhu PT-100 memiliki pembacaan yang terlebih akurat. Hasil pengujian sensor suhu thermocouple ditunjukkan dalam Tabel II.

TABEL II
HASIL PEMBANDINGAN SENSOR DENGAN MODUL PT-100

No	Suhu thermometer	Sensor suhu Thermocouple Pengukuran ke-			Suhu rata - rata thermocouple	Error rata-rata
		I	II	III		
		1	26	26		
2	30	30	30	31	30.33	0.33
3	35	36	35	35	35.33	0.33
4	44	44	45	44	44.33	0.33
5	57	56	57	57	56.67	-0.33
6	62	62	63	62	62.33	0.33
7	72	72	73	72	72.33	0.33
8	100	101	100	100	100.33	0.33
9	105	106	105	105	105.33	0.33
10	109	109	109	109	109.00	0.00
11	111	112	111	111	111.33	0.33
13	118	118	118	118	118.00	0.00
14	122	123	122	122	122.33	0.33
15	129	129	128	129	128.67	-0.33
16	132	132	132	132	132.00	0.00
17	138	138	138	138	138.00	0.00
18	140	139	140	140	139.67	-0.33
19	143	143	143	143	143.00	0.00
20	148	147	147	147	147.00	-1.00
21	154	154	154	154	154.00	0.00
22	158	158	159	158	158.33	0.33
23	162	162	162	162	162.00	0.00
24	168	168	168	169	168.33	0.33
25	174	176	174	175	175.00	1.00
26	178	178	178	179	178.33	0.33
27	180	181	180	180	180.33	0.33

28	184	185	185	186	185.33	1.33
29	190	191	190	190	190.33	0.33
30	194	194	195	195	194.67	0.67
31	200	199	200	200	199.67	-0.33
32	208	209	209	208	208.67	0.67
Jumlah Error						6.00
Rata - rata Error						0.19

Dari Tabel II dapat diketahui bahwa hasil pengujian menunjukkan jumlah error nya adalah 6 dan rata – rata nilai errornya sebesar 0,19. Dengan nilai tersebut dapat disimpulkan bahwa sensor thermocouple layak digunakan karena memiliki rata – rata error dibawah toleransi error maksimal yaitu sebesar 0,50.

B. Pengujian Modul LCD

Pengujian ini bertujuan untuk menganalisis menganalisis keberhasilan LCD menampilkan string sesuai dengan karakter yang dikirimkan dari compiler menuju mikrokontroler.

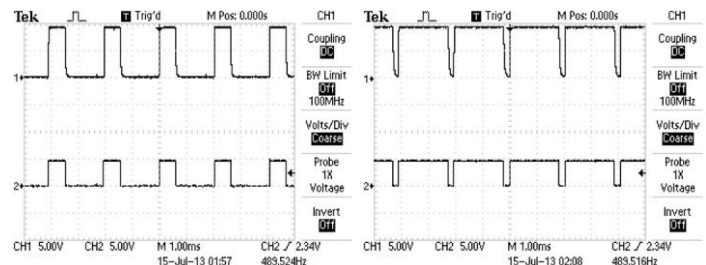


Gb. 4 Pengujian Modul LCD

Dalam Gb 4 dapat diamati bahwa LCD dapat menampilkan karakter “ *Pengujian LCD* ”. Custom karakter animasi *space invader* juga dapat ditampilkan dengan baik oleh LCD. Berdasarkan hasil pengujian dapat disimpulkan bahwa LCD dapat bekerja dengan baik, begitu pula dengan program penampil karakter pada LCD telah sesuai dengan yang diharapkan.

C. Pengujian Speed Control Driver Motor DC

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui apakah rangkaian driver motor yang telah dirancang mampu mendrive sinyal PWM (Pulse width Modulation) keluaran dari mikrokontroler, serta mengetahui perubahan lebar pulsa PWM berupa *duty cycle* berdasarkan perubahan bit, sehingga dapat digunakan untuk mengatur kecepatan motor kipas angin. Sinyal *duty cycle* PWM ditunjukkan dalam Gb 5 dan 6.



Gb. 5 Keluaran PWM 30%

Gb. 6 Keluaran PWM 90%

TABEL III
HASIL PENGUJIAN PWM DAN TEGANGAN PEMICUAN MOSFET

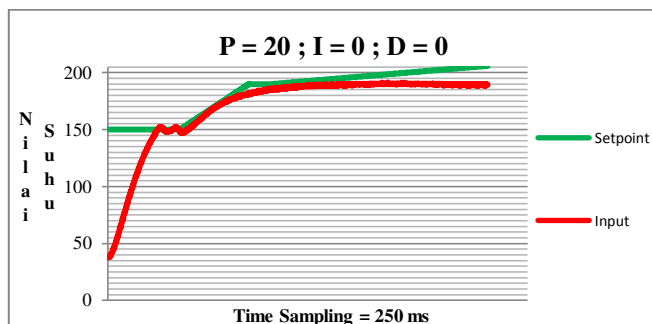
Presentase Duty Cycle	Nilai Bit	Tegangan (V)	Error
10%	25	0.999	0.001
20%	51	1.929	0.071
30%	76	2.833	0.167
40%	102	3.798	0.202
50%	127	4.74	0.26
60%	153	5.72	0.28
70%	178	6.68	0.32
80%	204	7.68	0.32
90%	229	8.63	0.37
100%	255	9.48	0.52

Dari tabel III dapat dilihat hubungan antara prosentase *duty cycle*, nilai bit dan tegangan pemecuan FET. Perubahan *duty cycle* dan bit keluaran memberikan perubahan terhadap tegangan pemecuan FET. Simpangan error maksimal terjadi pada pemecuan 10V yaitu sebesar 5,2%. Dengan demikian proses pengaturan kecepatan motor kipas angin dapat berjalan sesuai dengan yang diharapkan.

D. Pengujian Sistem Kontrol PID Melalui Metode Hand tuning

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui apakah penentuan nilai parameter Kp, Ki dan Kd melalui metode *hand tuning* telah sesuai dan mengetahui apakah respon sistem telah harapan berdasarkan karakteristik *plant* yang diatur.

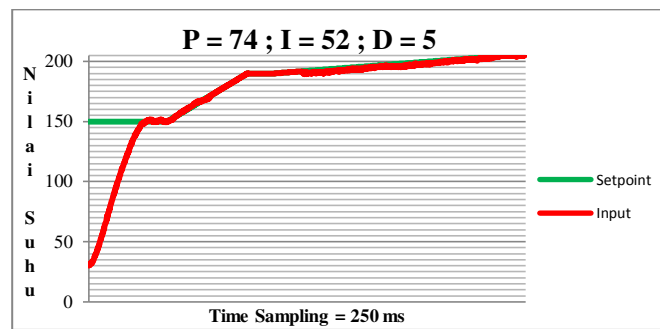
Dalam metode penentuan parameter secara manual, langkah pertama adalah memberikan nilai nol pada parameter Ki dan Kd. Kemudian parameter Kp dinaikan sampai output loop mencapai osilasi. Parameter Ki kemudian dinaikan sampai error steady state tereliminasi. Terlalu banyak nilai Ki akan menyebabkan ketidakstabilan sistem. Terakhir nilai parameter Kd ditingkatkan jika dibutuhkan, sampai loop dirasakan cukup cepat untuk mencapai setpoint setelah ada gangguan beban. Namun terlalu banyak nilai pada Kd akan menyebabkan respon yang terlalu cepat dan menyebabkan *overshoot*.



Gb. 7 Grafik INPUT terhadap SETPOINT Pengujian ke - 1

Pada percobaan pertama nilai, Kp, Ki dan Kd yang diberikan secara berurutan adalah 20,0,0. Dalam grafik input terhadap setpoint dalam Gb.7, karakteristik tanggapan plant

(pemanas) terhadap nilai Kp pada setpoint 150° C yaitu , waktu naik (t_r) = 101 detik, waktu puncak (t_p) = 107.6 detik, Waktu penetapan (t_s) = 116 detik. Maksimum overshoot (M_p) = 1.61 %. Pada setpoint diatas 150° C, sistem tidak mampu mencapainya.



Gb. 8 Grafik INPUT terhadap SETPOINT Pengujian ke - 15

Pada percobaan kelimabelas nilai, Kp, Ki dan Kd yang diberikan secara berurutan adalah 74,52,5. Dalam grafik input terhadap setpoint dalam Gb.8, karakteristik tanggapan plant (pemanas) terhadap nilai Kp pada setpoint 150° C yaitu , waktu naik (t_r) = 90,9 detik, waktu puncak (t_p) = 98,7 detik, Waktu penetapan (t_s) = 104,1 detik. Maksimum overshoot (M_p) = 2,03 %. Pada setpoint diatas 150° C, sistem cenderung sangat stabil dan nilai error cukup kecil.

Meningkatnya harga Kp tanpa diikuti parameter lainnya mengakibatkan respon sistem semakin cepat namun sistem menjadi tidak stabil dikarenakan simpangan nilai *error* yang terjadi, cukup tinggi dan terjadi osilasi yang tinggi pula. Selain itu sistem tidak mampu mencapai *steady state* pada *setpoint* di atas 150° C. Sehingga perlu ditambahkan parameter Ki untuk melakukan aksi koreksi.

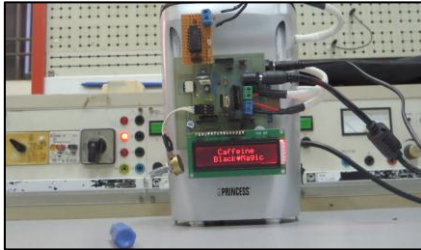
Dengan meningkatkan harga Ki dengan nilai Kp yang tetap menyebabkan simpangan error semakin mengecil tetapi sistem masih kurang stabil karena menjadi semakin lambat dan terjadi perubahan nilai input secara drastis terhadap nilai setpoint, baik berupa *drop* maupun overshoot yang terlalu tinggi dalam rentang waktu sesaat. Selain itu lambatnya sistem juga mengakibatkan nilai input sering kali tertinggal terlampaui jauh dari nilai setpoint ketika setpoint beranjak naik dari 150° C menuju 190° C.

Sehingga diperlukan memberikan harga kepada parameter Kd. Ketika nilai Kd ditingkatkan, *respond* sistem menjadi semakin baik ditandai dengan hilangnya perubahan – perubahan dramatis ditengah – tengah berjalanya sistem. Karena aksi koreksi menjadi semakin cepat, sehingga nilai error juga semakin berkurang. Akhirnya, dipatkan nilai parameter Kp, Ki dan Kd yang mampu membuat *respond* sistem menjadi lebih baik dan mampu menyesuaikan karakteristik dari plant itu sendiri. Dengan nilai Kp, Ki, dan Kd berturut – turut adalah 74, 52, 5; didapatkan nilai maksimum *overshoot* (M_p) untuk setpoint 150° C, 150° C – 190° C, 190° C, 190-205° C adalah 1,19%, 1,27%, 0,47 %, 1, 01 %. Sedangkan nilai rata – rata error nya adalah berturut – turut 0,36; 0,06; 0,70; -1,20.

E. Pengujian Keseluruhan Sistem

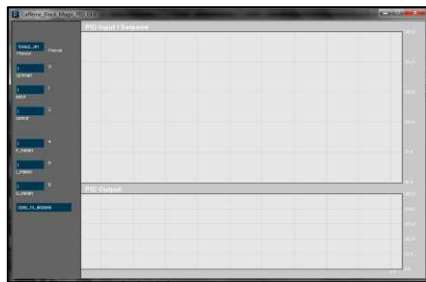
Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui apakah sistem yang telah didesain mampu melakukan proses *coffee roasting*

sesuai dengan kaidah yang telah ditentukan sebelumnya. Pengujian dilakukan secara bertahap sesuai prosedur kerja sistem yang telah dirancang. Pengujian sistem secara keseluruhan dilakukan tahap demi tahap sesuai dengan prosedur kerja sistem. Langkah pertama yaitu menhidupkan sistem, LCD display akan menampilkan pesan selamat datang dan menunggu pengguna untuk menekan tombol seperti dalam Gb 9.



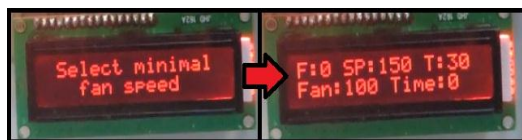
Gb 9 Tampilan LCD ketika sistem *start-up*

Selanjutnya, muncul tampilan untuk pengguna agar mengatur kecepatan kipas minimum melalui potensiometer. Pada pengujian kali ini kecepatan minimum di set pada kecepatan 34 – 35 %. Kemudian tampilan GUI perlu diaktifkan untuk memantau grafik yang terjadi dan parameter – parameter PID yang ada ketika proses *roasting*. Adapun tampilan GUI ditunjukkan dalam Gb. 10.



Gb. 10 Tampilan GUI

Ketika tombol ditekan lagi, yang terjadi ialah elemen pemanas akan menyala dan proses *roasting* telah dimulai. Sehingga tampilan dalam LCD akan berubah dan tampilan GUI akan mulai menggambar grafik input, output dan setpoint yang terjadi selama proses *roasting*. Perubahan tampilan LCD ditunjukkan dalam Gb 11. LCD display akan menampilkan parameter – parameter yang dibutuhkan dalam proses *roasting*.



Gb. 11 Perubahan tampilan LCD

Adapun penjelasan mengenai parameter tersebut adalah sebagai berikut :

- F (*Phase*): Fase *Roasting* yang terjadi
- SP (*Setpoint*): Nilai *Setpoint* suhu yang dituju
- T (*Temperature*): Suhu yang terjadi dan sebagai input dari sistem

- Time (*Timer*): Waktu penghitung mundur untuk setiap fase
- Fan (*Fanspeed*): Putaran kecepatan kipas dalam bentuk prosentase

Pada pengujian ini, *greenbean* dimasukkan pada fase 0. Di akhir fase ini, kopi yang disangrai melalui tahap *yellowing*. Ini merupakan fase awal dimana terjadi proses *endothermic* (penyerapan panas) yang membuat *green bean* secara perlahan mengering, warna berubah menjadi kuning muda dan kulit ari mulai terlepas. Proses *yellowing* pada biji kopi ditunjukkan dalam Gb.12.



Gb. 12 Perubahan warna *greenbean* akibat fase *yellowing*

Selanjutnya, sistem memasuki fase 1 dimana nilai *setpoint* di set pada suhu 150° C dan suhu dijaga tetap dalam kurun waktu 60 detik. Pada akhir dari fase ini, kopi yang tersangrai melalui tahap *steam*, dimana air yang terkandung dalam biji kopi mulai menguap. Proses *steam* atau penguapan pada biji kopi ditunjukkan dalam Gb. 13.



Gb. 13 Fase *steam*



Gb. 14 Fase *light brown stage*

Lalu, ketika waktu penghitung mundur telah selesai menghitung selama 60 detik, maka sistem akan beralih menuju fase selanjutnya yaitu fase kedua. Pada fase ini suhu akan dinaikan secara bertahap dari 150° C menuju 190° C dalam durasi waktu 180 detik atau 13,3° C/menit. Pada akhir dari fase ini, kopi yang tersangrai melalui fase *light brown stage*, Proses pada fase *light brown stage* ditunjukkan dalam Gb.14. Selanjutnya, ketika suhu telah mencapai 190° C dan waktu penghitung mundur telah berakhir, maka sistem akan menuju fase selanjutnya yaitu fase ke-3.

Pada fase ini *setpoint* akan diatur pada suhu 190° C dan dijaga selama 60 detik. Pada akhir dari fase ini, kopi yang tersangrai melalui fase *brown stage*, dimana warna dari biji kopi terlihat berwarna coklat tua seperti dalam Gb.15. Setelah fase ketiga berakhir, sistem akan memasuki fase terakhir sebelum proses pendinginan.

Pada fase keempat, *setpoint* di set dari 190 ° C menuju 205° C selama 600 detik / 3° C tiap menit. Pada akhir dari fase ini, kopi yang tersangrai melalui tahap *first crack*, dimana tercium bau harum dari biji kopi. Segera setelah itu akan terdengar suara retakan pertama. Kandungan gula mulai terkaramelisasi, ikatan air mulai terlepas, minyak mulai

keluar dan ukuran dari biji menjadi dua kali lebih besar. Fase ini ditunjukkan dalam Gb.16.

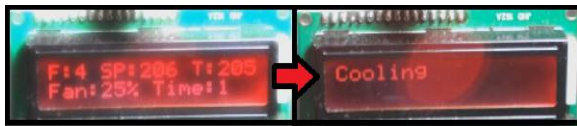


Gb. 15 Fase *brown stage*



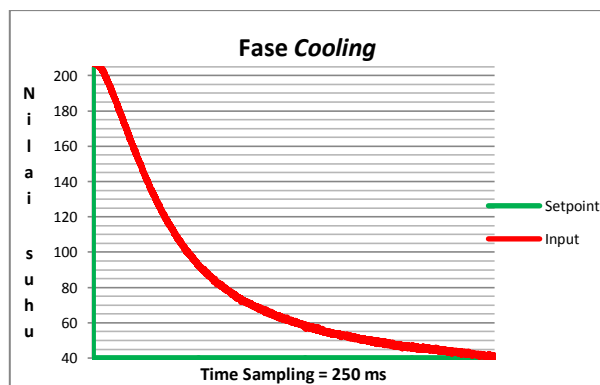
Gb. 16 Fase *first crack*

Saat suhu sudah mencapai 205°C atau lebih dan waktu penghitung mundur telah berakhir, sistem akan menjalankan fase pendinginan. Pada fase ini setpoint di atur pada 40°C . Fase ini diperuntukan agar biji kopi yang telah disangrai (*roasted coffee*) segera dapat diolah menuju proses selanjutnya, baik proses grinding untuk selanjutnya disajikan maupun proses penyimpanan. Perubahan tampilan pada LCD dari fase 4 menuju fase *cooling* ditunjukkan dalam Gb.17.



Gb. 17 Perubahan tampilan LCD menuju fase *cooling*

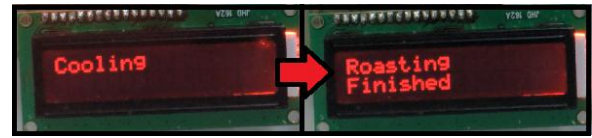
Pada fase *cooling* sistem sudah tidak lagi melakukan control secara perhitungkan melainkan hanya menggunakan sistem switch dimana kecepatan motor putaran kipas di set maksimum dan elemen heater dimatikan, sehingga suhu dapat diturunkan secara drastis dalam waktu singkat. Nilai Kp, Ki dan Kd yang digunakan dalam pengujian ini berturut – turut adalah 74, 52, dan 5. Parameter tersebut adalah parameter terbaik yang didapatkan melalui *trial and error* yang telah tercantum pada bagian pengujian PID. Respon karakteristik sistem bisa ditinjau pada bagian pengujian sistem control PID menggunakan metode *hand tuning*. Sedangkan mengenai respon karakteristik sistem pada fase *cooling*, ditunjukkan dalam Gb. 18.



Gb.18 Respon karakteristik sistem saat fase *cooling*

Ketika suhu sudah turun di titik 40°C , maka sistem akan berhenti. Pada kondisi ini proses *roasting* dapat dikatakan sepenuhnya berakhir dan *roasted coffee* (biji kopi yang telah tersangrai) siap untuk dibawa kepada proses selanjutnya. Perubahan tampilan pada LCD dari fase *cooling*

menuju *finish* ditunjukkan dalam Gb.19. Secara keseluruhan sistem telah berjalan sesuai dengan harapan karena telah berjalan sesuai dengan yang ada di perancangan.



Gb. 19 Perubahan tampilan LCD menuju akhir dari proses

V. KESIMPULAN

- 1) Agar pemantauan proses *roasting* dapat berjalan dengan optimal maka diperlukan sensor suhu yang mampu mengukur suhu dalam biji kopi (ketika proses *endothermic*) bukan suhu ruang pemanasan. Pada perancangan ini digunakan pengukuran suhu ruang dan hasilnya kopi yang telah tersangrai (*roasted coffee*) yang seharusnya berhenti pada tahap awal dari *first crack* yaitu pada suhu 401°F / 205°C namun dari hasil pengujian hasil *roasting* berada pada tahap *full city+* yang merupakan akhir dari fase *first crack* dengan suhu 435°F / 220°C , jadi simpangan *error* suhu sebesar 15°C .
- 2) Sistem kontrol PID yang digunakan dalam sistem berfungsi memperbaiki *respond* pengaturan kecepatan motor kipas angin. Dimana elemen pemanas memiliki karakteristik berupa suhunya naik secara cepat ketika diaktifkan tetapi suhunya turun secara lambat ketika dimatikan. Dari beberapa kali pengujian secara *hand tuning* didapatkan nilai parameter dengan nilai kesalahan paling minimum untuk Kp, Ki dan Kd dengan berturut – turut adalah 74, 52 dan 5.
- 3) Sensor suhu digunakan untuk mengukur suhu ruang penyangraian ketika proses *roasting* berjalan. Dalam perancangan digunakan sensor suhu *thermocouple* jenis-k. Dari beberapakali *sampling* pengujian kalibrasi antara sensor yang digunakan dengan modul sensor PT-100 yang telah teruji akurasi, didapatkan selisih *error* sebesar 0,19 %. Sedangkan toleransi *error* dari modul PT-100 sendiri adalah sebesar 0,5 %.
- 4) Sistem driver motor yang digunakan pada perancangan ini menggunakan MOSFET IRF540N, dimana nilai Vgs yang digunakan sebesar 10V, namun tegangan keluaran maksimum mikrokontroler hanya sebesar 5V. Agar tidak terjadi arus balik ke unit mikrokontroler akibat tegangan tambahan untuk pemicuan MOSFET maka diperlukan rangkaian pemisah (*isolated*). Pada hasil pengujian pengukuran tegangan pemicuan MOSFET maksimal yakni 10V didapatkan simpangan *error* maskimal sebesar 0,52V atau 5,2 %.

REFERENCES

- [1] D'Souza, A.Frank.1988. *Design of control system*. New Jersey: Prentice Hall International.
- [2] Kenneth, Davids.2003. *Home Coffee Roasting, Revised, Updated Edition: Romance and revival*. San Fransisco: St. Martin's Griffin.
- [3] Malvino, Albert, Paul. 1996. *Prinsip-prinsip Elektronika*. alih bahasa Hanafi Gunawan. Jakarta: Erlangga.
- [4] McRoberts, Mike. 2009. *A Complete Beginners Guide to Arduino*. USA: Earthshine Electronics.
- [5] Margolis, Michael. 2011. *Arduino Cookbook*. Sebastopol CA: O'Reilly.