

BAB V

PENGUJIAN DAN ANALISIS

Bab ini membahas pengujian dan analisis alat yang telah dirancang dari peralatan yang telah dibuat. Pengujian dilakukan dengan pengukuran tiap-tiap blok dengan tujuan mengamati apakah blok-blok tersebut bekerja sesuai dengan yang diharapkan.

Pengujian dilakukan berdasarkan pada masing-masing komponen pendukung dari alat secara keseluruhan. Pengujian yang dilakukan adalah pengujian terhadap:

- 1) Pengujian sensor suhu *thermocouple* melalui IC AD595
- 2) Pengujian speed control driver motor DC
- 3) Pengujian Modul LCD
- 4) Pengujian sistem control dengan menggunakan PID manual tuning
- 5) Pengujian Keseluruhan Sistem
- 6) Pengujian Kualitatif lewat *coffee cupping test* standar SCAA

5.1 Pengujian sensor suhu *thermocouple* melalui IC AD595

5.1.1 Tujuan

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*.

5.1.2 Peralatan

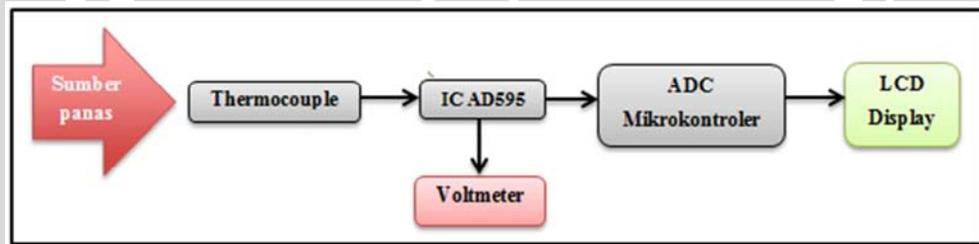
Peralatan yang digunakan pada pengujian ini adalah:

- 1) Sumber tegangan DC 5 Volt
- 2) *Thermocouple* tipe-k
- 3) IC AD595
- 4) LCD *display* 16 x 2
- 5) Mikrokontroler Arduino
- 6) Voltmeter
- 7) Element pemanas / heater
- 8) Thermometer Digital dan Modul PT100

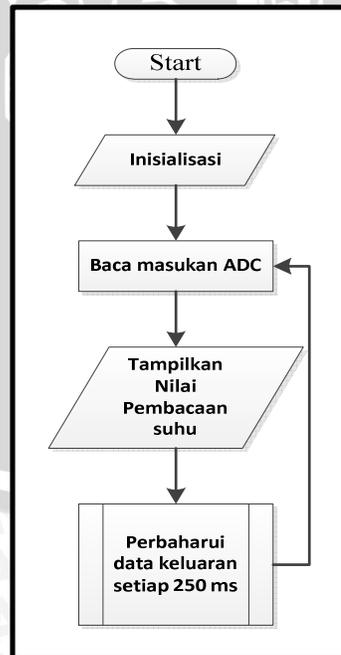
5.1.3 Prosedur Pengujian

Prosedur pengujian sensor suhu *thermocouple* adalah sebagai berikut:

- 1) Mengatur rangkaian sesuai diagram blok yang ditunjukkan dalam Gambar 5.1.
- 2) Membuat program seperti yang ditunjukkan pada diagram alir dalam Gambar 5.2
- 3) Membandingkan nilai keluaran suhu kamar yang dideteksi oleh sensor suhu *thermocouple* dengan thermometer digital.
- 4) Menngaktifkan element pemanas.
- 5) Mengukur nilai keluaran suhu dari thermocouple dan membandingkannya dengan modul PT-100 sehingga diketahui besar nilai error.



Gambar 5. 1 Diagram blok pengujian sensor suhu *thermocouple*



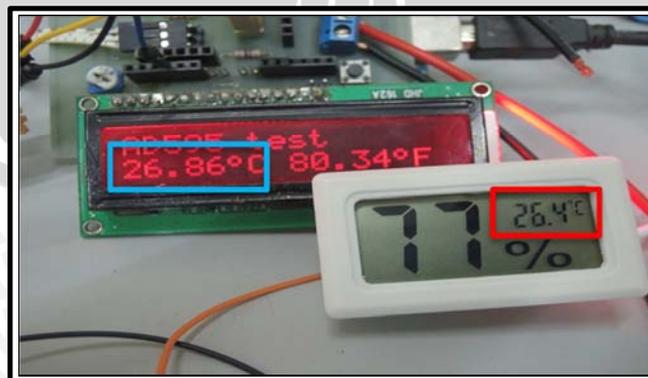
Gambar 5. 2 Diagram alir program pengujian sensor suhu *thermocouple*

5.1.4 Hasil Pengujian

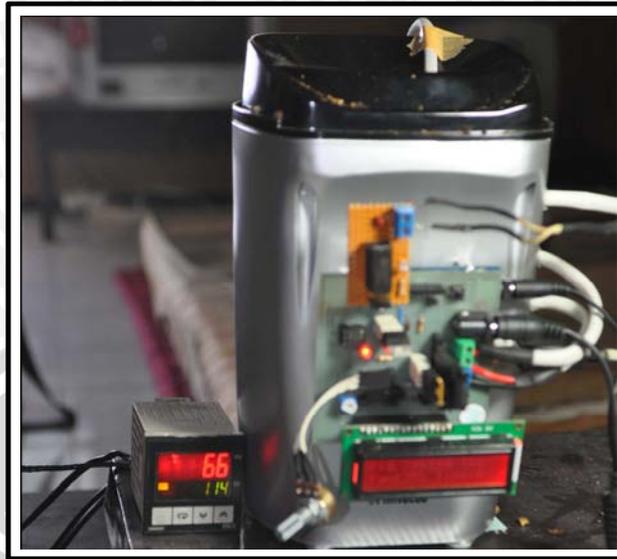
Ketika dibandingkan dengan pembacaan thermometer digital, nilai suhu hasil pembacaan thermocouple hampir mendekati nilai thermometer digital. Proses perbandingan nilai suhu ruang dengan thermometer digital dapat dilihat dalam Gambar 5.3. Untuk hasil pembacaan nilai tegangan keluaran IC AD595 dapat dilihat dalam Tabel 5.1. Sedangkan proses perbandingan pembacaan nilai suhu thermocouple dengan modul PT-100 ditunjukkan dalam Gambar 5.4.

Tabel 5. 1 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



Gambar 5. 3 Perbandingan *thermocouple* dengan *thermometer* digital



Gambar 5. 4 Pembandingan nilai suhu *thermocouple* dengan modul PT-100

5.1.5 Analisis Hasil Pengujian

Proses pengujian sensor suhu berupa *thermocouple* ini merupakan proses 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 5.2.

Tabel 5. 2 Hasil pengujian kalibrasi *thermocouple* dengan modul sensor suhu PT-100

No	Suhu thermometer	Sensor suhu Thermocouple Pengukuran ke-			Suhu Rata-rata thermocouple	Error rata-rata
		I	II	III		
1	26	26	26	26	26.00	0.00
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

Kalibrasi dilakukan sebanyak 32 kali dengan cara menaikan nilai suhu secara bertahap. Dimana proses pengukuran sensor thermocouple dengan modul PT-100 dilakukan secara bersamaan. Dari Tabel 5.1 dapat diketahui bahwa hasil pengujian menunjukan 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.

5.2 Pengujian Modul LCD

5.2.1 Tujuan

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

5.2.2 Peralatan

Peralatan yang digunakan pada pengujian ini adalah:

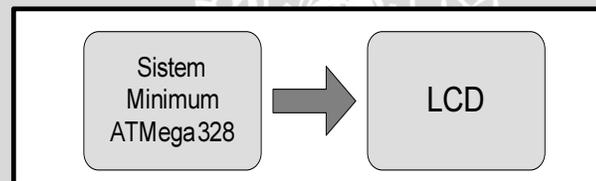
- 1) Minimum Sistem mikrokontroler ATmega328
- 2) Modul LCD 16 x 2

3) Software Arduino IDE 022

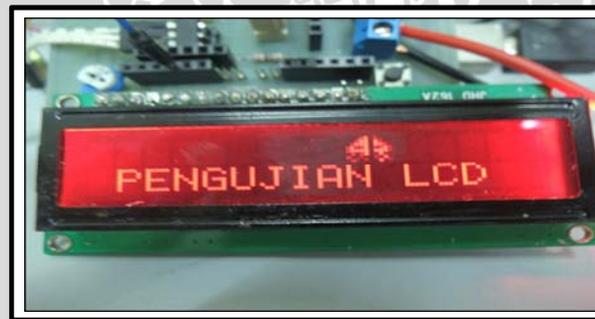
5.2.3 Prosedur Pengujian

Prosedur pengujian rangkaian *optocoupler* MOC3021 adalah sebagai berikut:

- 1) Menyusun perangkat lunak menggunakan *Software Arduino IDE 0022*, melakukan *compiling*, lalu melakukan *uploading* program ke mikrokontroler ATmega328. Perangkat lunak berisikan program untuk menampilkan karakter "Pengujian LCD" pada baris bawah dan menampilkan custom karakter berupa animasi pada game *space invader* pada baris atas.
- 2) Mengatur rangkaian sesuai diagram blok yang ditunjukkan dalam Gambar 5.5.
- 3) Mengamati tampilan pada modul LCD



Gambar 5. 5 Diagram Blok Pengujian LCD



Gambar 5. 6 Tampilan dari hasil pengujian LCD

5.2.4 Analisis dan hasil Pengujian

Dalam Gambar 5.6 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.

5.3 Pengujian speed control driver motor DC

5.3.1 Tujuan

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.

5.3.2 Peralatan

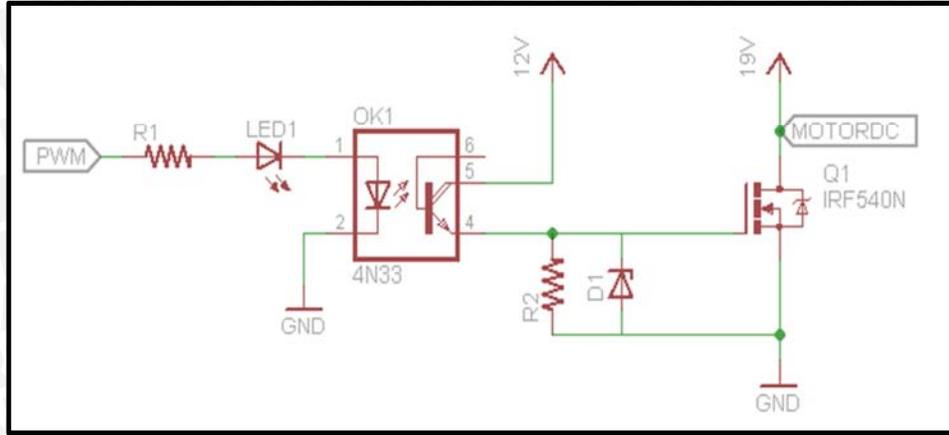
Peralatan yang digunakan untuk pengujian *speed control* driver motor DC adalah sebagai berikut:

- 1) Mikrokontroler Arduino dan sumber tegangan DC 5 volt
- 2) Sumber Tegangan 12 V
- 3) IRF 540 N
- 4) *Oscilloscope* TEKTRONIX TDS-1012B
- 5) Rangkaian driver motor
- 6) Potensiometer 100 k Ω
- 7) Resistor 270 Ω , 120 Ω
- 8) Diode zener 9 V
- 9) Opto 4N33
- 10) Lampu LED

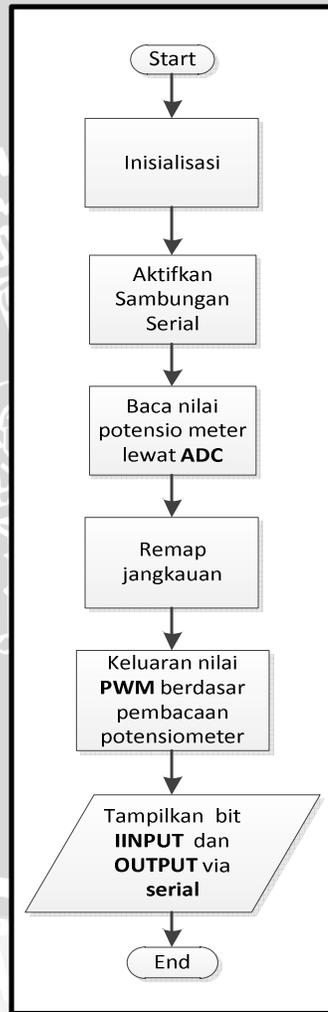
5.3.3 Prosedur Pengujian

Prosedur pengujian rangkaian *speed control* driver motor DC yang digunakan adalah sebagai berikut:

- 1) Merangkai rangkaian pengujian seperti ditunjuk dalam Gambar 5.7
- 2) Membuat program sesuai diagram alir yang ditunjuk dalam Gambar 5.8
- 3) Menghubungkan sumber tegangan sumber tegangan DC 5 volt ke mikrokontroler, DC 12 volt ke optocoupler 4N33 dan FET IRF540N.
- 4) Menghubungkan potensiometer ke sumber tegangan DC 5 volt dan GND serta ke salah satu pin ADC mikrokontroler.
- 5) Menghubungkan *probe 1* oscilloscope ke keluaran mikrokontroler di pin 3 sebagai keluaran PWM dari mikrontroller dan *probe 2* oscilloscope ke tegangan keluaran FET IRF540N.



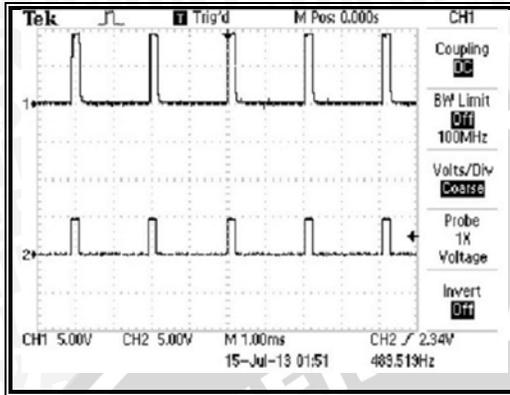
Gambar 5. 7 Rangkaian pengujian *speed control driver*



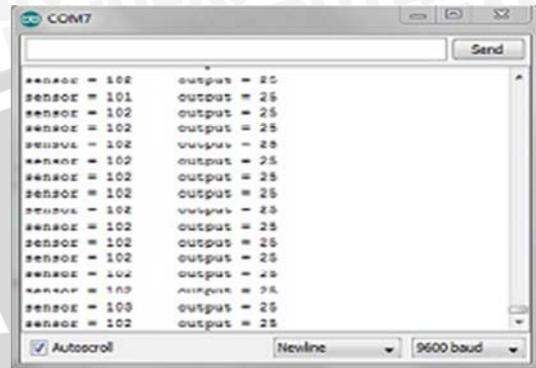
Gambar 5. 8 Diagram alir rangkaian pengujian penyulutan TRIAC

5.3.4 Hasil Pengujian

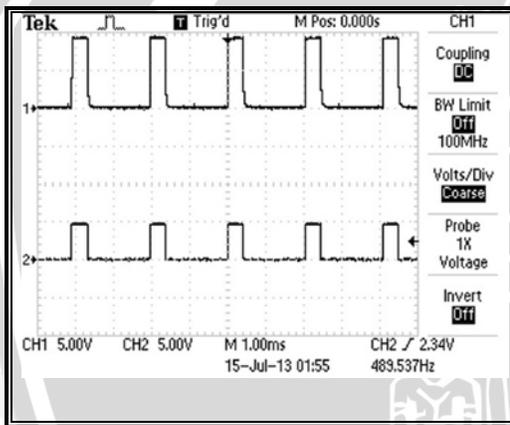
Berikut adalah beberapa gambar grafik sinyal keluaran PWM dan nilai bit masukan serta keluaran yang dibaca via serial monitor.



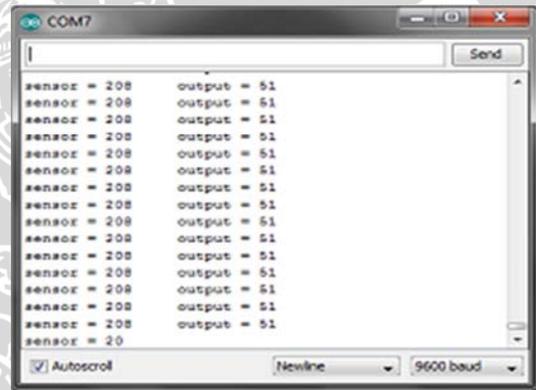
Gambar 5. 9 Keluaran PWM 10%



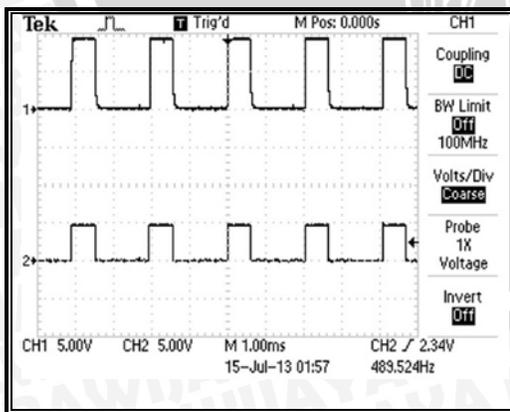
Gambar 5. 10 Bit I/O 10%



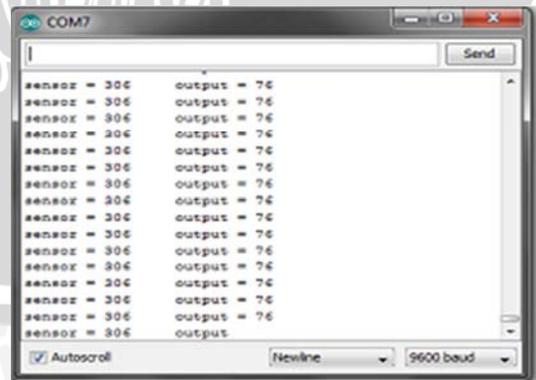
Gambar 5. 11 Keluaran PWM 20%



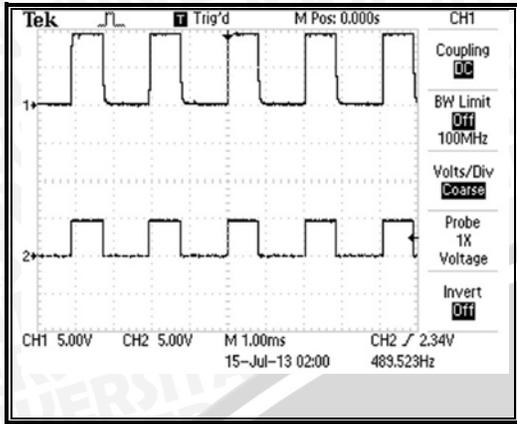
Gambar 5. 12 Bit I/O 20%



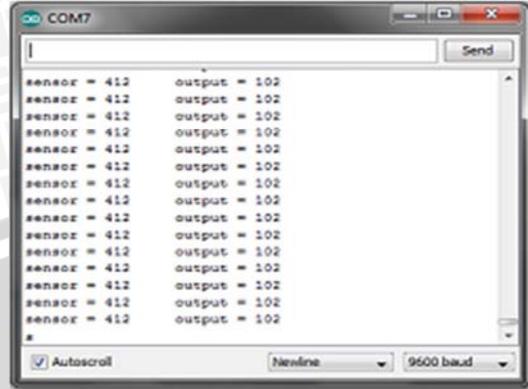
Gambar 5. 13 Keluaran PWM 30%



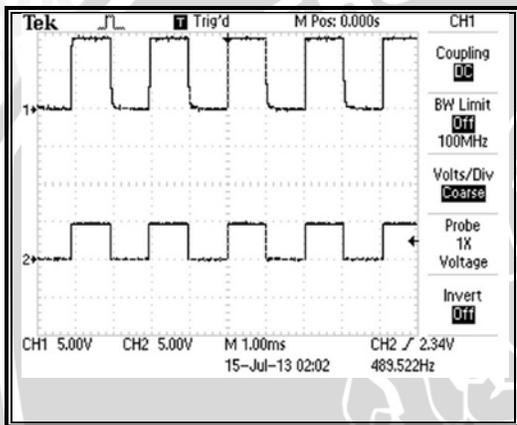
Gambar 5. 14 Bit I/O 30%



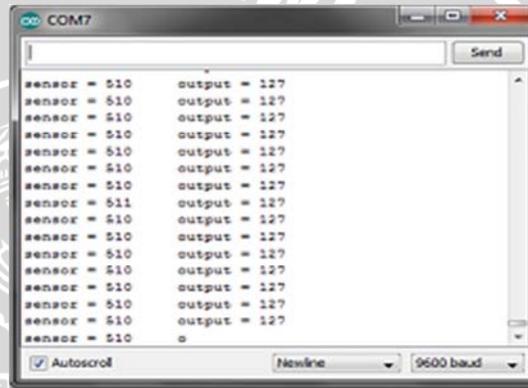
Gambar 5. 15 Keluaran PWM 40%



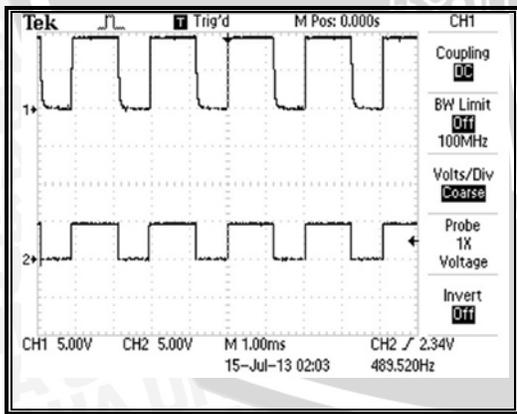
Gambar 5. 16 Bit I/O 40%



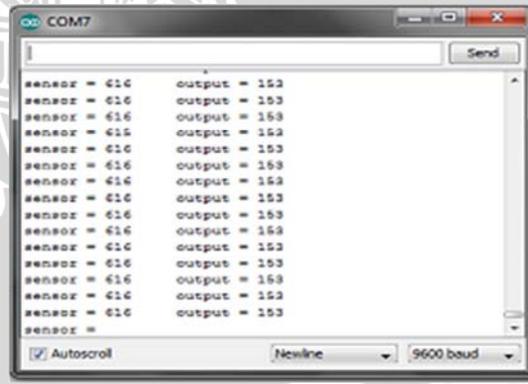
Gambar 5. 17 Keluaran PWM 50%



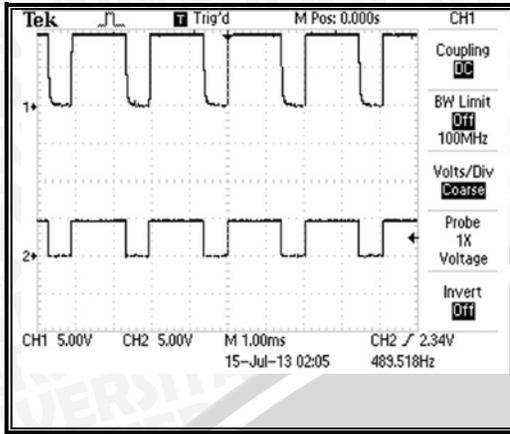
Gambar 5. 18 Bit I/O 50%



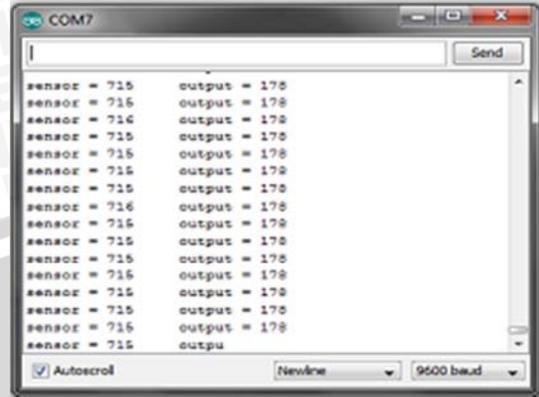
Gambar 5. 19 Keluaran PWM 60%



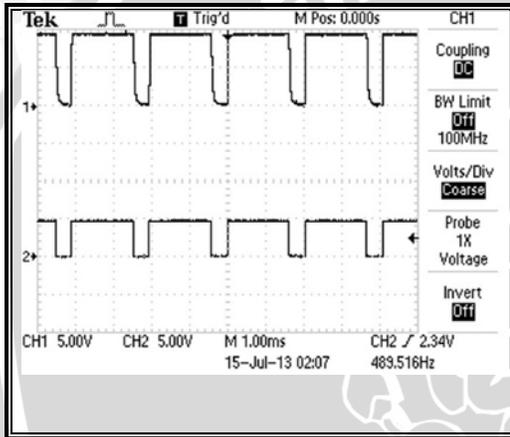
Gambar 5. 20 Bit I/O 60%



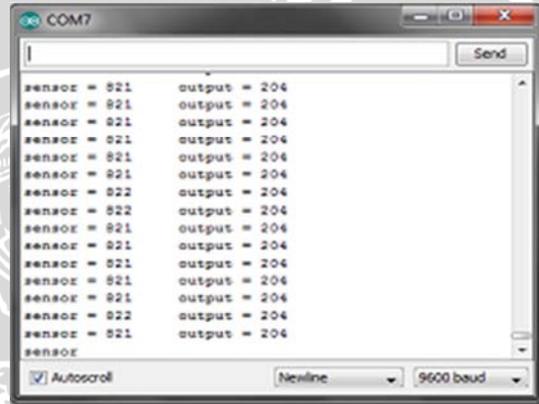
Gambar 5. 21 Keluaran PWM 70%



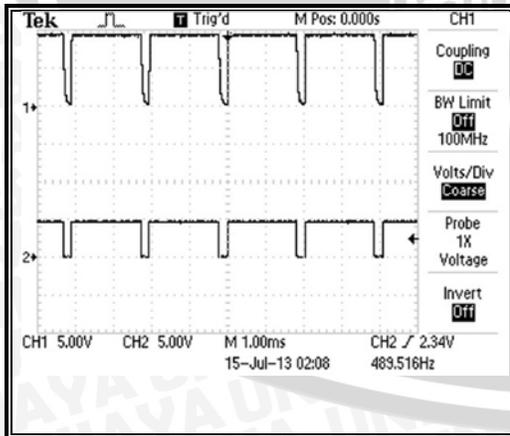
Gambar 5. 22 Bit I/O 70%



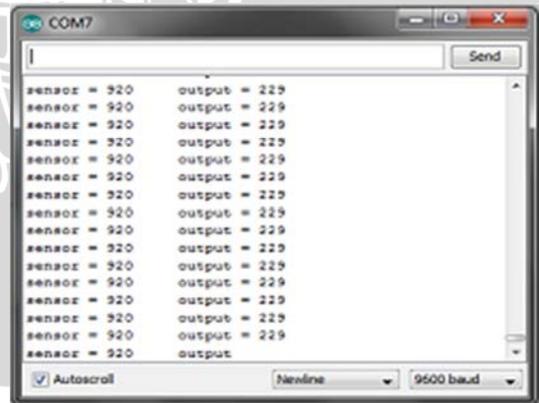
Gambar 5. 23 Keluaran PWM 80%



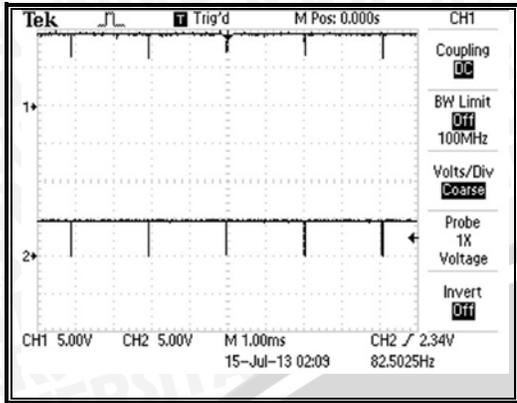
Gambar 5. 24 Bit I/O 80%



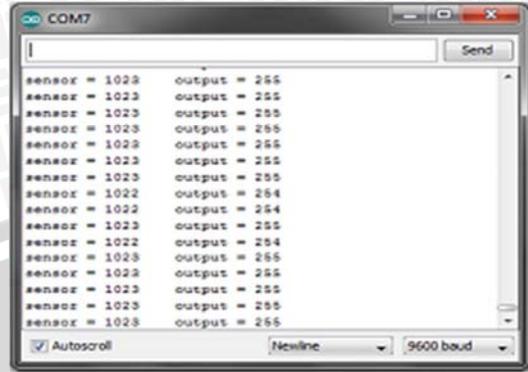
Gambar 5. 25 Keluaran PWM 90%



Gambar 5. 26 Bit I/O 90%



Gambar 5. 27 Keluaran PWM 100%



Gambar 5. 28 Bit I/O 100%

5.3.5 Analisis Hasil Pengujian

PWM merupakan sebuah cara efektif dan tepat untuk mengatur tegangan keluaran dengan waktu konstan yang besar atau dengan kata lain, kita dapat membangkitkan sinyal pulsa yang lebarnya dapat diatur pada frekuensi tertentu. Sehingga sinyal pulsa tersebut dapat mengatur prosentase antara kapan waktunya hidup dan kapan waktunya mati. Prosentase kapan waktunya hidup dikenal dengan istilah *duty cycle*. Tujuan pengujian PWM kali ini adalah mengetahui bentuk keluaran sinyal PWM dari mikrokontroller yang terhubung dengan driver motor dan mengetahui perubahan tegangan keluaran yang digunakan untuk memicu FET.

Tabel 5. 3 Hasil pengujian sinyal 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

Dalam Gambar 5.9 hingga Gambar 5.28 dapat dilihat perubahan secara teratur dari lebar sinyal PWM ketika nilai prosentasi duty cycle dinaikan secara perlahan berdasarkan aturan perubahan bit keluaran dan masukan dari mikrokontroller. Ketika

nilai bit dinaikan secara perlahan, terlihat terjadi peningkatan lebar pulsa hingga mencapai titik maksimalnya ($\text{Bit} = 255$; Duty Cycle 100%), sehingga dapat ditarik tabel hubungan seperti pada tabel 5.2. Dari tabel 5.2 dapat dilihat hubungan antara presentase *duty cycle*, nilai bit dan tegangan pemecuan FET. Perubahan *duty cycle* dan bit keluaran memberikan perubahan terhadap tegangan pemecuan FET. Dengan demikian proses pengaturan kecepatan motor kipas angin dapat berjalan sesuai dengan yang diharapkan.

5.4 Pengujian Sistem Kontrol PID melalui metode *hand tuning*

5.4.1 Tujuan

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

5.4.2 Peralatan

Peralatan yang digunakan untuk pengujian sistem control PID melalui metode *hand tuning* adalah sebagai berikut:

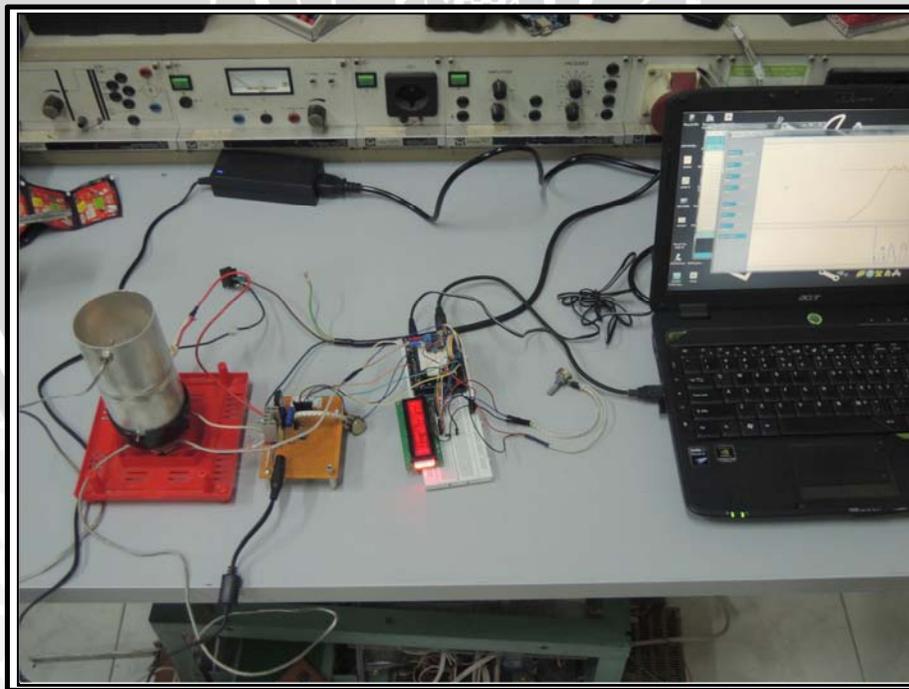
- 1) Mikrokontroler Arduino dan sumber tegangan DC 12 Volt
- 2) LCD display 16 x 2
- 3) Sumber tegangan DC 19 V
- 4) Sumber tegangan AC 220 V dengan daya > 1200 Watt
- 5) Rangkaian driver motor dan rangkain switch untuk elemen pemanas
- 6) Rangkaian sensor suhu
- 7) Arduino IDE 022 dan Processing IDE 1.5.1
- 8) Kabel USB
- 9) 1 unit Laptop

5.4.3 Prosedur Pengujian

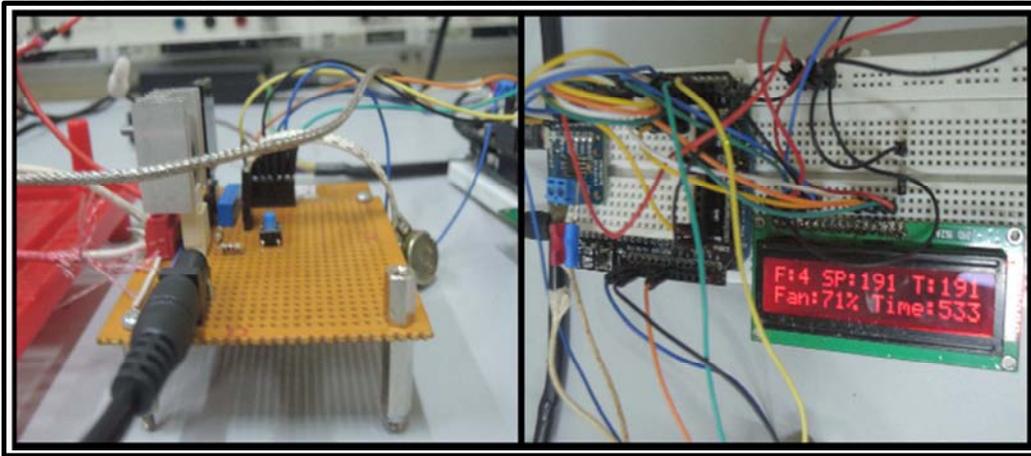
Prosedur pengujian sistem kontrol PID adalah sebagai berikut:

- 1) Hubungkan Mikrokontroler Arduino dengan semua rangkaian dan catu daya yang diperlukan.
- 2) Hubungkan mikrokontroller dengan laptop via USB.
- 3) Mengaktifkan GUI (*graphical user interface*) PID yang dibangun menggunakan Processing IDE 1.5.1

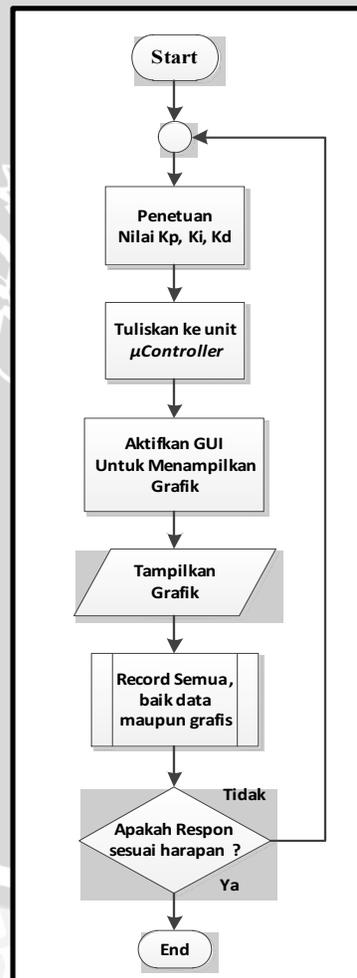
- 4) Mengaktifkan Arduino IDE dan memasukkan parameter K_p , K_i , K_d yang telah ditentukan lalu melakukan proses compiling dan menuliskannya ke mikrokontroler
- 5) Memastikan alamat *data record* pengujian PID dalam bentuk file dengan ekstensi .txt. Dan memastikan untuk proses selanjutnya, data lama akan diflash.
- 6) Mengaktifkan alat dan merekam grafik yang terjadi baik secara multimedia maupun secara data.
- 7) Proses pengujian dimulai dengan nilai $K_p = 20$; $K_i = 0$; $K_d = 0$. Kemudian parameter K_p dinaikan sampai output loop mencapai osilasi. Lalu parameter K_i kemudian dinaikan sampai error steady state tereliminasi. Terakhir nilai parameter K_d ditingkatkan jika dibutuhkan, sampai loop dirasakan cukup cepat untuk mencapai setpoint setelah ada gangguan beban
- 8) Setiap kali melakukan penggantian nilai parameter PID, ulangi prosedur no. 4 – no.6.
- 9) Proses dihentikan setelah didapatkan parameter dengan respons yang paling stabil.



Gambar 5. 29 Proses pengujian parameter PID



Gambar 5. 30 Rangkaian – rangkaian yang digunakan dalam proses pengujian PID

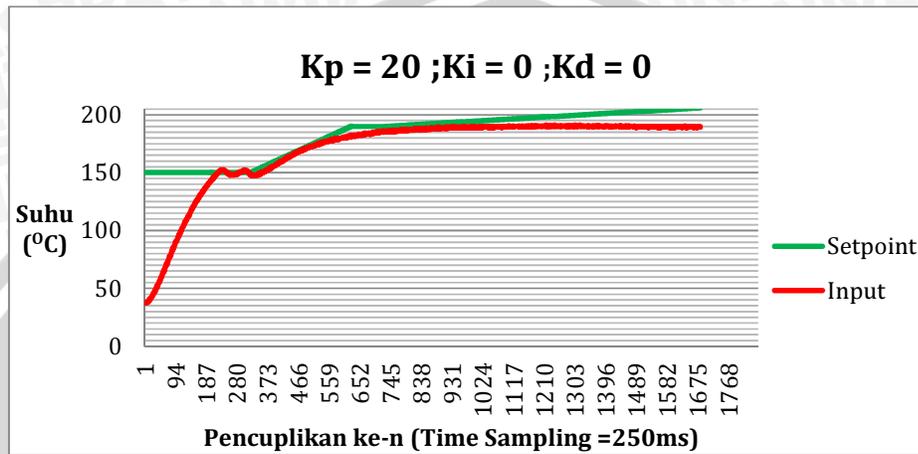


Gambar 5. 31 Diagram alir proses pengujian sistem kontrol PID

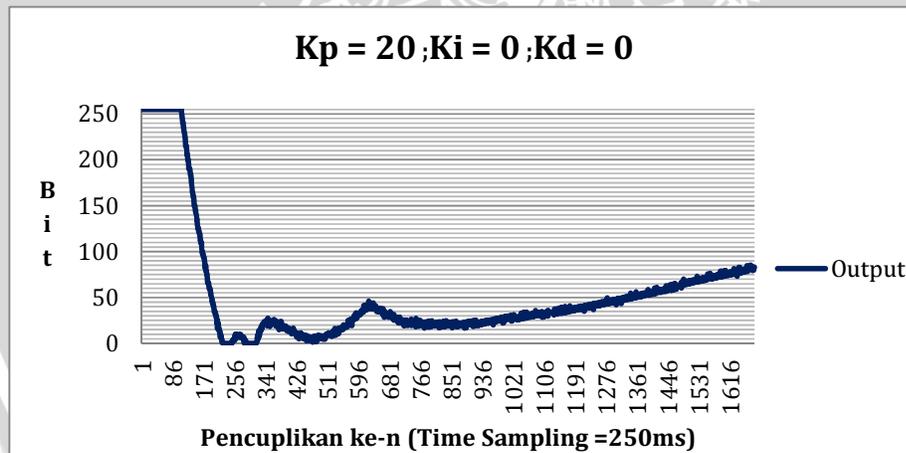
5.4.4 Data Hasil Pengujian

Berikut adalah data pengujian sistem kontrol PID dengan nilai setpoint yang telah diatur sesuai roasting profile yang telah ditentukan dalam bab perancangan.

Pengujian ke - 1



Gambar 5. 32 Grafik INPUT terhadap SETPOINT Pengujian ke - 1

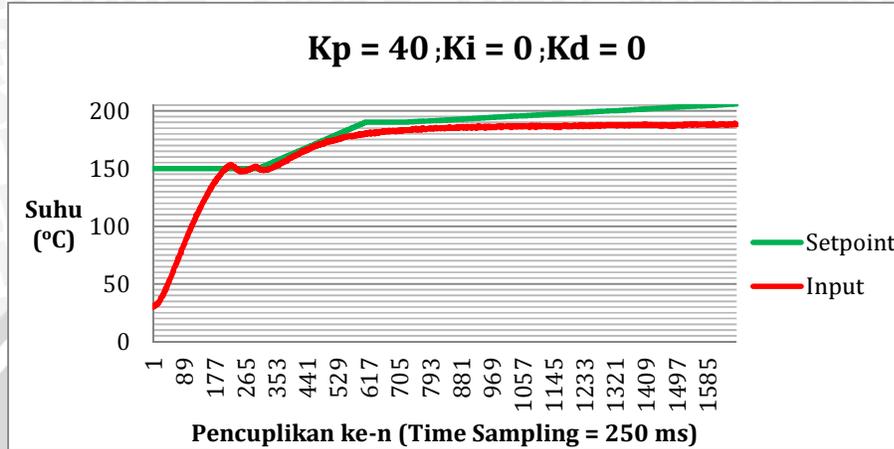


Gambar 5. 33 Grafik OUTPUT Pengujian ke - 1

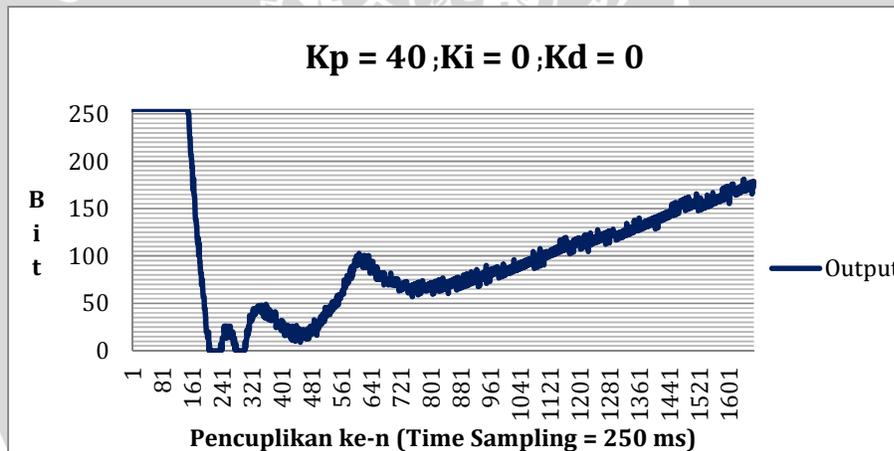
Pada percobaan pertama nilai, Kp, Ki dan Kd yang diberikan secara berurutan adalah 20,0,0. Dalam grafik input terhadap setpoint, karakteristik tanggapan *plant* (pemanas) terhadap nilai Kp pada setpoint 150° C yaitu , waktu naik (t_r) = 101 detik, waktu puncak (t_p) =107.6 detik, Waktu penetapan (t_s) = 116 detik. Maksimum overshoot (M_p) = 1.61 %. Sedangkan Gambar OUTPUT berupa grafik putaran kecepatan kipas bisa ditinjau dalam Gambar 5.33. Pada setpoint diatas 150° C, sistem

tidak mampu mencapainya.

Pengujian ke - 2



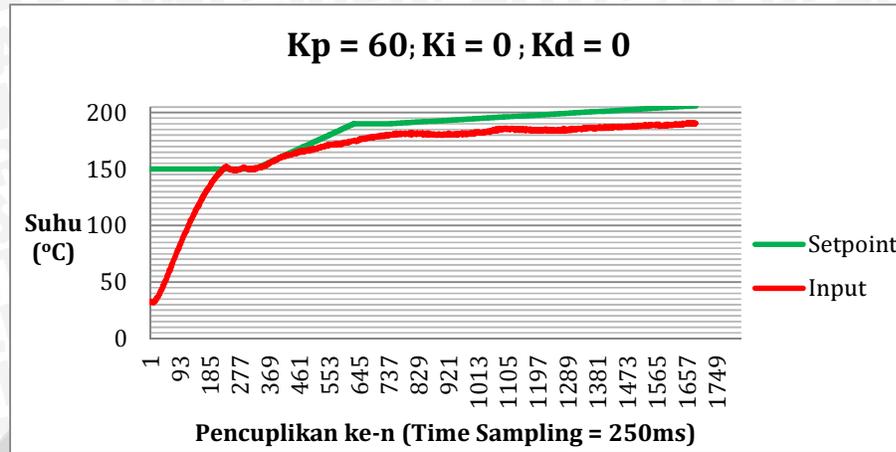
Gambar 5. 34 Grafik INPUT terhadap SETPOINT Pengujian ke - 2



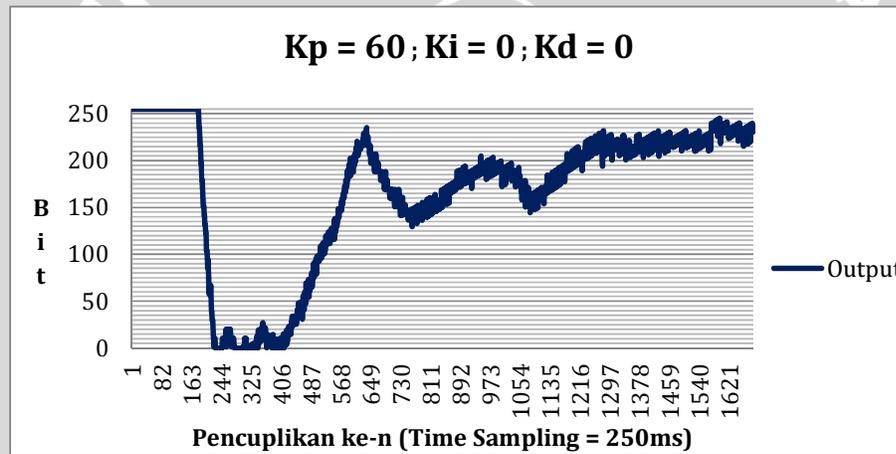
Gambar 5. 35 Grafik OUTPUT Pengujian ke - 2

Pada percobaan kedua nilai, K_p , K_i dan K_d yang diberikan secara berurutan adalah 40,0,0. Dalam grafik input terhadap setpoint, karakteristik tanggapan *plant* (pemanas) terhadap nilai K_p pada setpoint 150°C yaitu, waktu naik (t_r) = 94,95 detik, waktu puncak (t_p) = 103,95 detik, Waktu penetapan (t_s) = 111,75 detik. Maksimum overshoot (M_p) = 2,45 %. Sedangkan Gambar OUTPUT berupa grafik putaran kecepatan kipas bisa ditinjau dalam Gambar 5.35. Pada setpoint diatas 150°C , sistem tidak mampu mencapainya.

Pengujian ke - 3



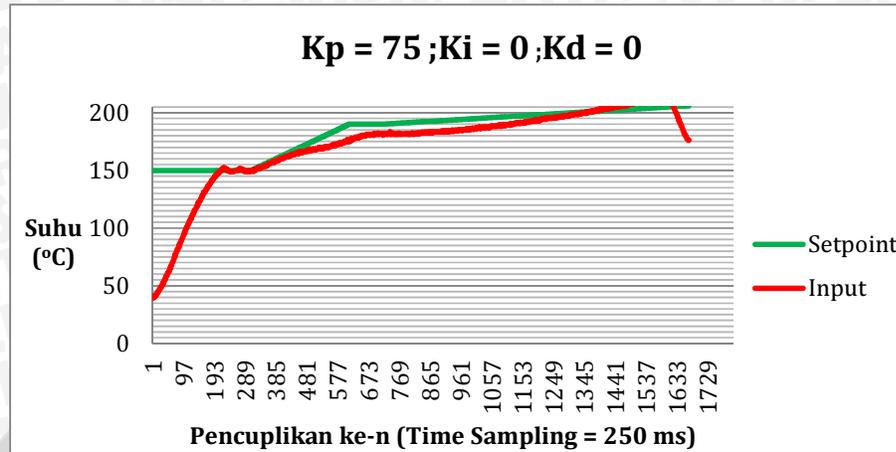
Gambar 5. 36 Grafik INPUT terhadap SETPOINT Pengujian ke - 3



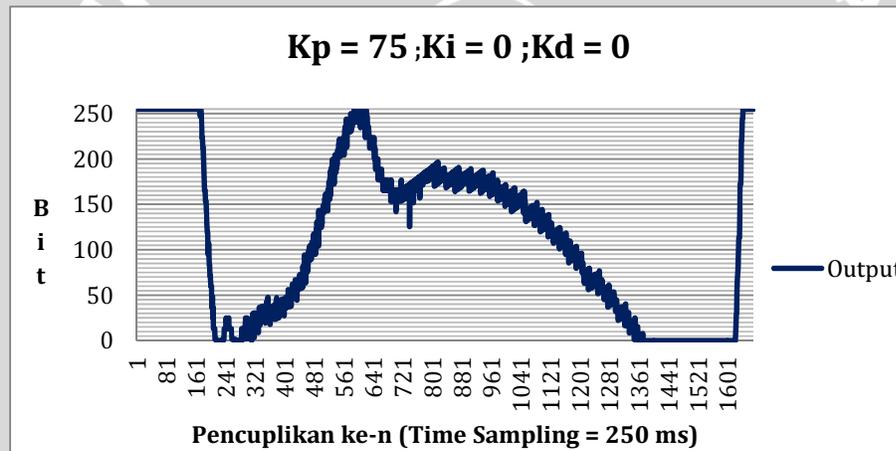
Gambar 5. 37 Grafik OUTPUT Pengujian ke - 3

Pada percobaan ketiga nilai, K_p , K_i dan K_d yang diberikan secara berurutan adalah 60,0,0. Dalam grafik input terhadap setpoint, karakteristik tanggapan *plant* (pemanas) terhadap nilai K_p pada setpoint 150°C yaitu, waktu naik (t_r) = 102,6 detik, waktu puncak (t_p) = 106,8 detik, Waktu penetapan (t_s) = 112,8 detik. Maksimum overshoot (M_p) = 1,61 %. Sedangkan Gambar OUTPUT berupa grafik putaran kecepatan kipas bisa ditinjau dalam Gambar 5.37. Pada setpoint diatas 150°C , sistem tidak mampu mencapainya.

Pengujian ke - 4



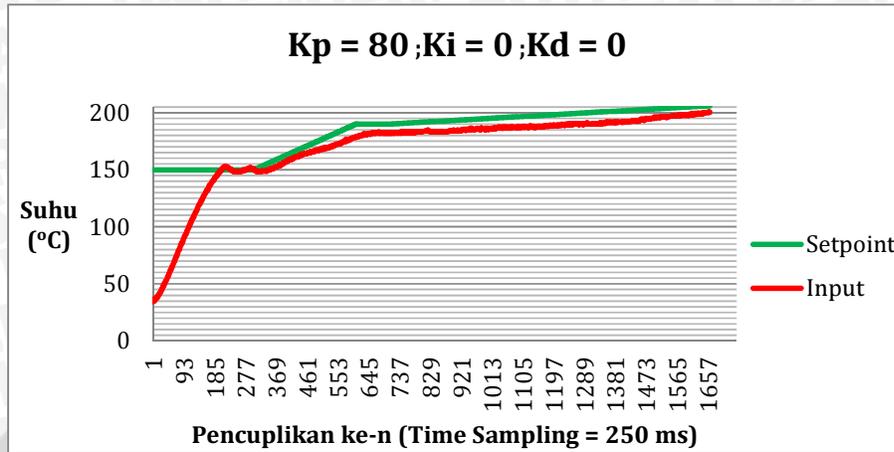
Gambar 5. 38 Grafik INPUT terhadap SETPOINT Pengujian ke - 4



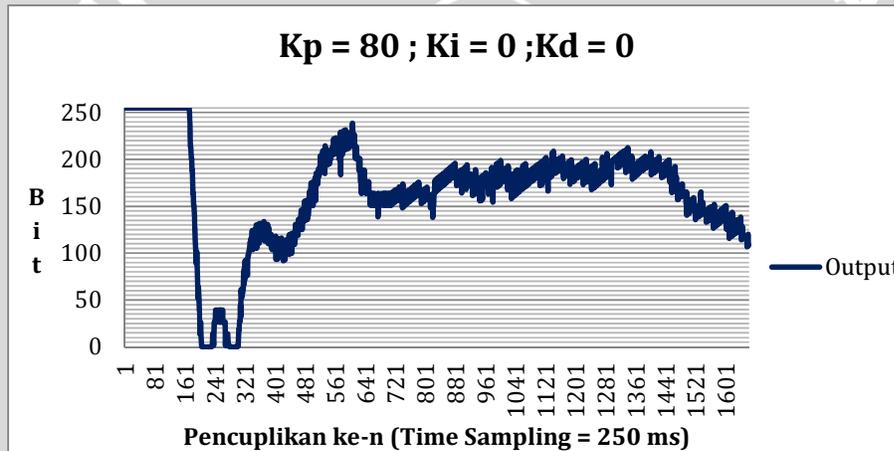
Gambar 5. 39 Grafik OUTPUT Pengujian ke - 4

Pada percobaan keempat nilai, K_p , K_i dan K_d yang diberikan secara berurutan adalah 75,0,0. Dalam grafik input terhadap setpoint, karakteristik tanggapan *plant* (pemanas) terhadap nilai K_p pada setpoint 150°C yaitu, waktu naik (t_r) = 96,75 detik, waktu puncak (t_p) = 100,65 detik, Waktu penetapan (t_s) = 108,75 detik. Maksimum overshoot (M_p) = 1,61 %. Sedangkan Gambar OUTPUT berupa grafik putaran kecepatan kipas bisa ditinjau dalam Gambar 5.39. Pada setpoint diatas 150°C , sistem tidak mampu mencapainya.

Pengujian ke - 5



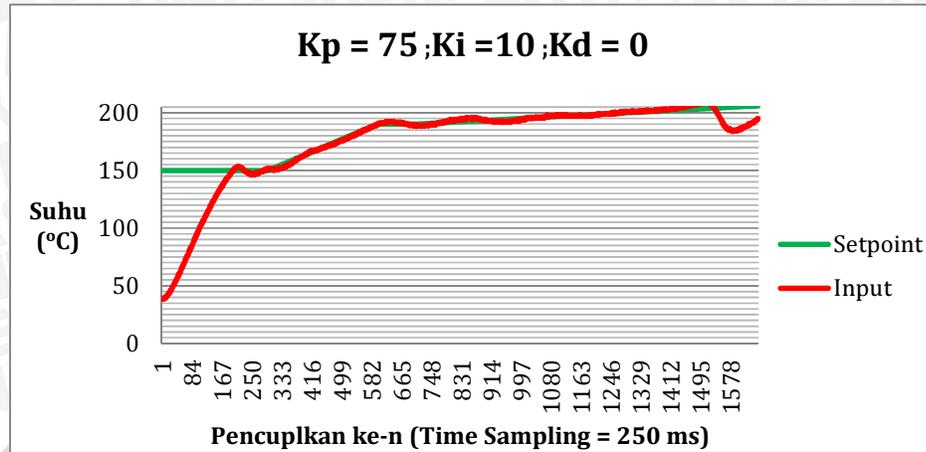
Gambar 5. 40 Grafik INPUT terhadap SETPOINT Pengujian ke - 5



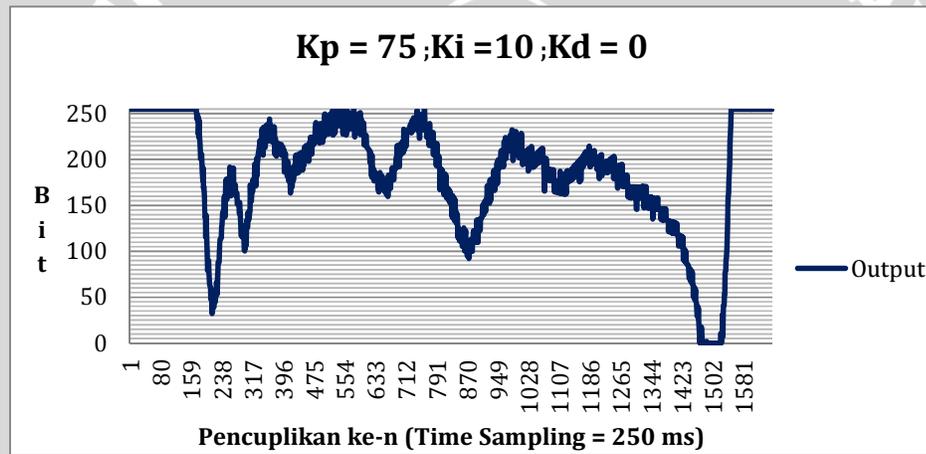
Gambar 5. 41 Grafik OUTPUT Pengujian ke - 5

Pada percobaan kelima nilai, K_p , K_i dan K_d yang diberikan secara berurutan adalah 80,0,0. Dalam grafik input terhadap setpoint, karakteristik tanggapan *plant* (pemanas) terhadap nilai K_p pada setpoint 150°C yaitu, waktu naik (t_r) = 92,7 detik, waktu puncak (t_p) = 99,3 detik, Waktu penetapan (t_s) = 108,9 detik. Maksimum overshoot (M_p) = 2,03 %. Sedangkan Gambar OUTPUT berupa grafik putaran kecepatan kipas bisa ditinjau dalam Gambar 5.41. Pada setpoint diatas 150°C , sistem tidak mampu mencapainya.

Pengujian ke - 6



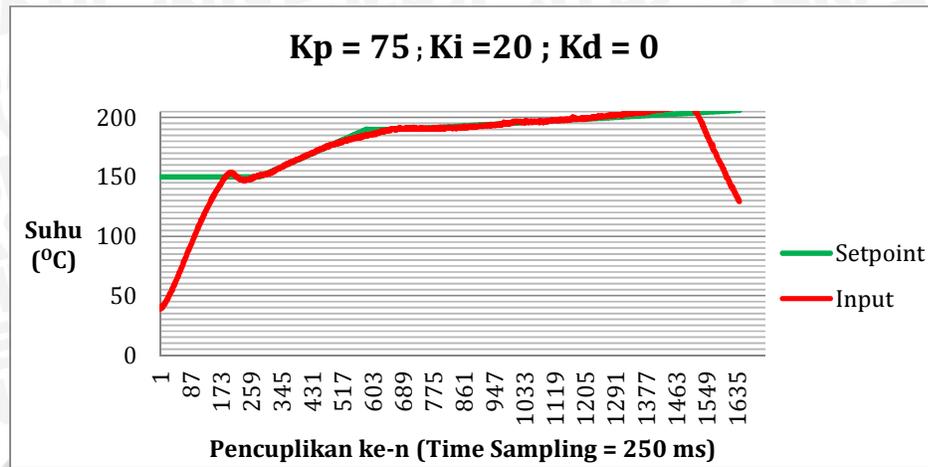
Gambar 5. 42 Grafik INPUT terhadap SETPOINT Pengujian ke - 6



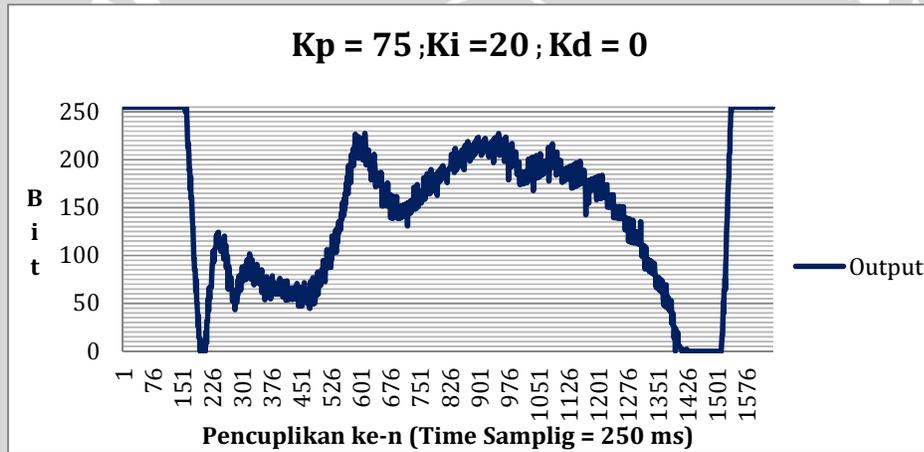
Gambar 5. 43 Grafik OUTPUT Pengujian ke - 6

Pada percobaan keenam nilai, K_p , K_i dan K_d yang diberikan secara berurutan adalah 75,10,0. Dalam grafik input terhadap setpoint, karakteristik tanggapan *plant* (pemanas) terhadap nilai K_p pada setpoint $150^{\circ}C$ yaitu, waktu naik (t_r) = 88,65 detik, waktu puncak (t_p) = 97,25 detik, Waktu penetapan (t_s) = 104,45 detik. Maksimum overshoot (M_p) = 2,45 %. Sedangkan Gambar OUTPUT berupa grafik putaran kecepatan kipas bisa ditinjau dalam Gambar 5.43. Pada setpoint diatas $150^{\circ}C$, sistem cenderung tidak stabil. Keterangan lebih jelas dapat dilihat dalam Tabel analisis hasil pengujian.

Pengujian ke - 7



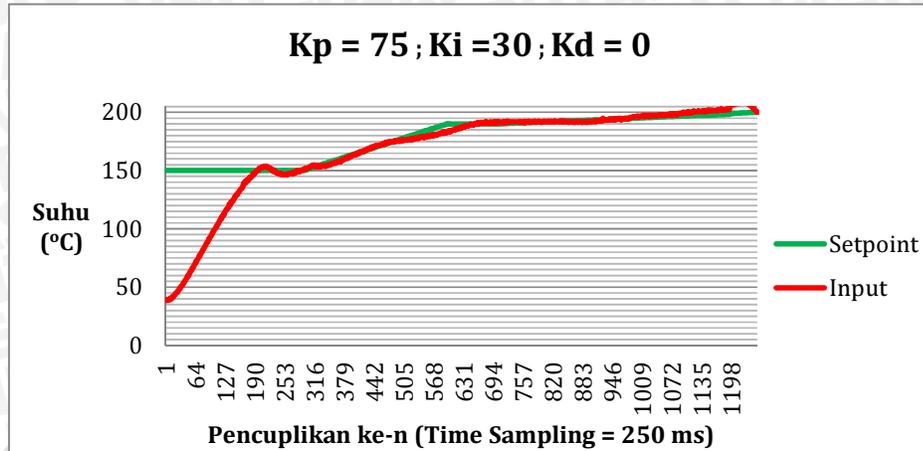
Gambar 5. 44 Grafik INPUT terhadap SETPOINT Pengujian ke - 7



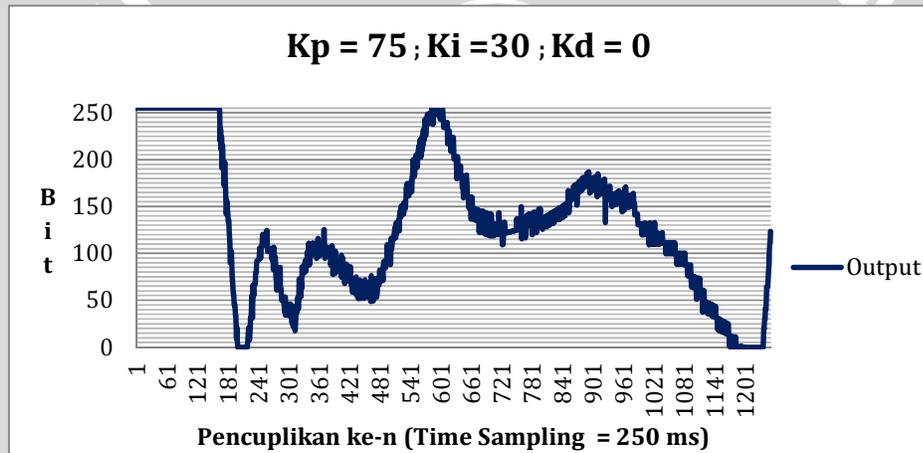
Gambar 5. 45 Grafik OUTPUT Pengujian ke - 7

Pada percobaan ketujuh nilai, K_p , K_i dan K_d yang diberikan secara berurutan adalah 75,20,0. Dalam grafik input terhadap setpoint, karakteristik tanggapan *plant* (pemanas) terhadap nilai K_p pada setpoint 150°C yaitu, waktu naik (t_r) = 83,7 detik, waktu puncak (t_p) = 100,9 detik, Waktu penetapan (t_s) = 102,9 detik. Maksimum overshoot (M_p) = 2,45 %. Sedangkan Gambar OUTPUT berupa grafik putaran kecepatan kipas bisa ditinjau dalam Gambar 5.45. Pada setpoint diatas 150°C , sistem cenderung tidak stabil karena input sering tertinggal dari nilai setpoint. Keterangan lebih jelas dapat dilihat dalam Tabel analisis hasil pengujian.

Pengujian ke – 8



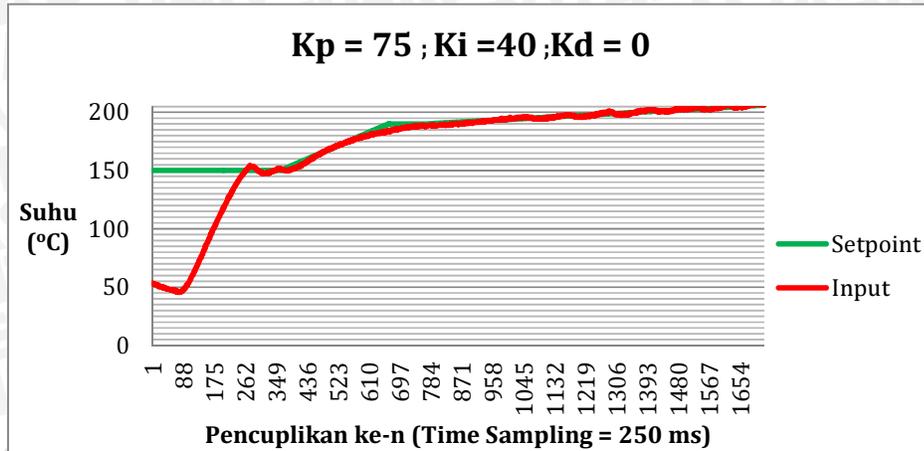
Gambar 5. 46 Grafik INPUT terhadap SETPOINT Pengujian ke - 8



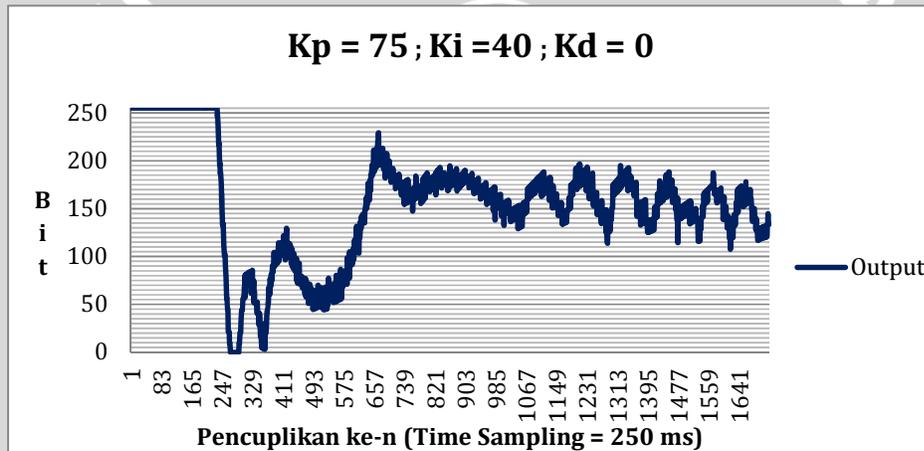
Gambar 5. 47 Grafik OUTPUT Pengujian ke - 8

Pada percobaan kedelapan nilai, K_p , K_i dan K_d yang diberikan secara berurutan adalah 75,30,0. Dalam grafik input terhadap setpoint, karakteristik tanggapan *plant* (pemanas) terhadap nilai K_p pada setpoint 150° C yaitu, waktu naik (t_r) = 87,75 detik, waktu puncak (t_p) =95,55 detik, Waktu penentuan (t_s) = 99,15 detik. Maksimum overshoot (M_p) = 2,45 %. Sedangkan Gambar OUTPUT berupa grafik putaran kecepatan kipas bisa ditinjau dalam Gambar 5.47. Pada setpoint diatas 150° C, sistem cenderung tidak stabil karena input sering tertinggal dari nilai setpoint dan terjadi overshoot berlebih. Keterangan lebih jelas dapat dilihat dalam Tabel analisis hasil pengujian.

Pengujian ke - 9



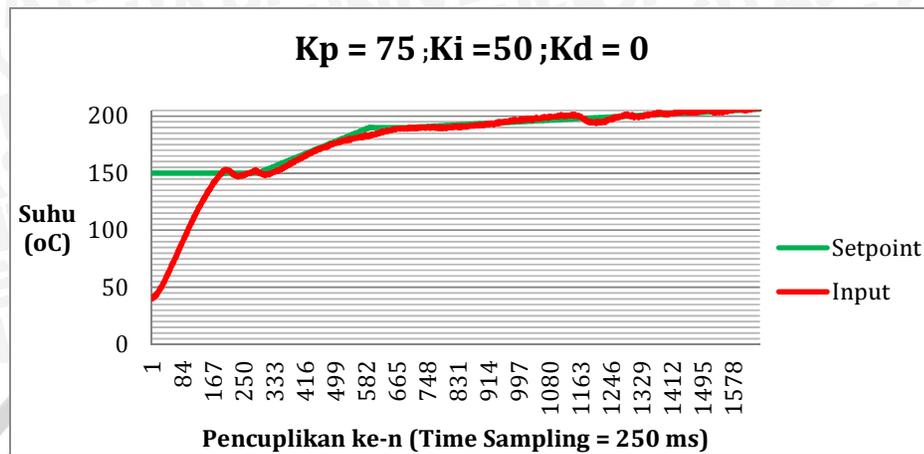
Gambar 5. 48 Grafik INPUT terhadap SETPOINT Pengujian ke - 9



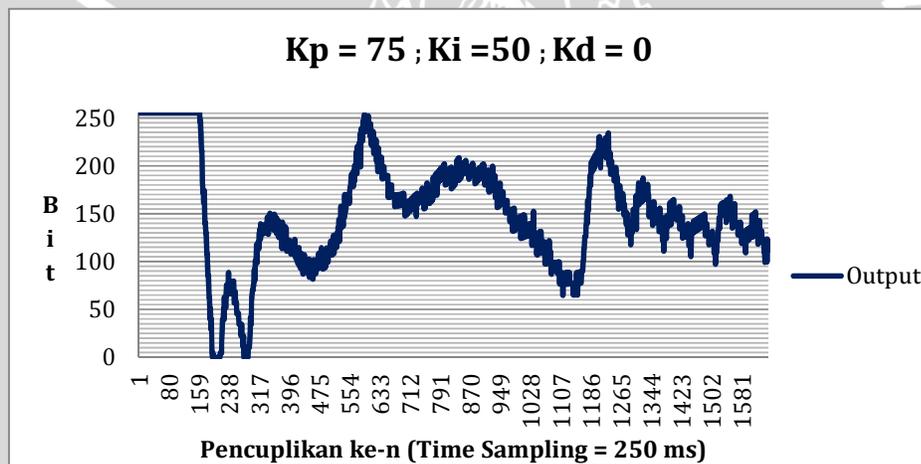
Gambar 5. 49 Grafik OUTPUT Pengujian ke - 9

Pada percobaan kesembilan nilai, K_p , K_i dan K_d yang diberikan secara berurutan adalah 75,40,0. Dalam grafik input terhadap setpoint, karakteristik tanggapan *plant* (pemanas) terhadap nilai K_p pada setpoint 150° C yaitu, waktu naik (t_r) = 89, 5 detik, waktu puncak (t_p) =96,7 detik, Waktu penetapan (t_s) = 104,5 detik. Maksimum overshoot (M_p) = 2,86 %. Sedangkan Gambar OUTPUT berupa grafik putaran kecepatan kipas bisa ditinjau dalam Gambar 5.49. Pada setpoint diatas 150° C, sistem cenderung tidak stabil karena input sering tertinggal dari nilai setpoint dan terjadi osilasi berlebih. Keterangan lebih jelas dapat dilihat dalam Tabel analisis hasil pengujian.

Pengujian ke - 10



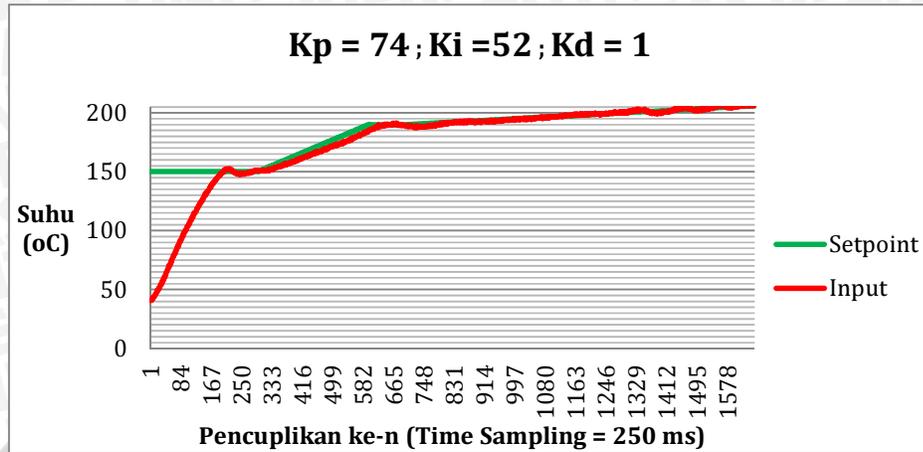
Gambar 5. 50 Grafik INPUT terhadap SETPOINT Pengujian ke - 10



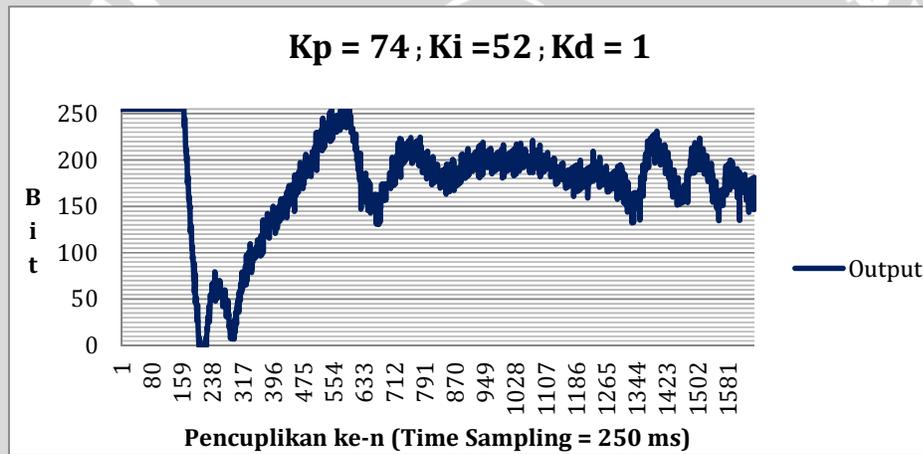
Gambar 5. 51 Grafik OUTPUT Pengujian ke - 10

Pada percobaan kesepuluh nilai, K_p , K_i dan K_d yang diberikan secara berurutan adalah 75,50,0. Dalam grafik input terhadap setpoint, karakteristik tanggapan *plant* (pemanas) terhadap nilai K_p pada setpoint 150°C yaitu, waktu naik (t_r) = 86, 4 detik, waktu puncak (t_p) = 91,8 detik, Waktu penetapan (t_s) = 99,8 detik. Maksimum overshoot (M_p) = 2,03 %. Sedangkan Gambar OUTPUT berupa grafik putaran kecepatan kipas bisa ditinjau dalam Gambar 5.51. Pada setpoint diatas 150°C , sistem cenderung tidak stabil karena input sering tertinggal dari nilai setpoint dan drop sesaat. Keterangan lebih jelas dapat dilihat dalam Tabel analisis hasil pengujian.

Pengujian ke - 11



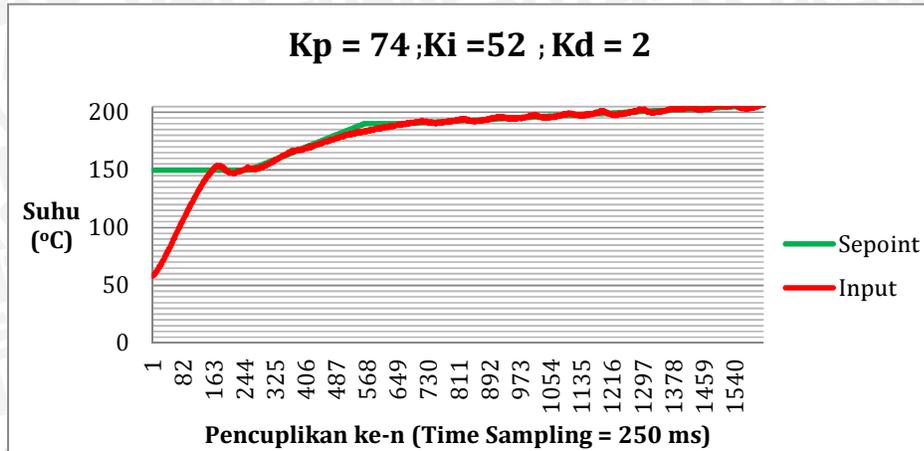
Gambar 5. 52 Grafik INPUT terhadap SETPOINT Pengujian ke - 11



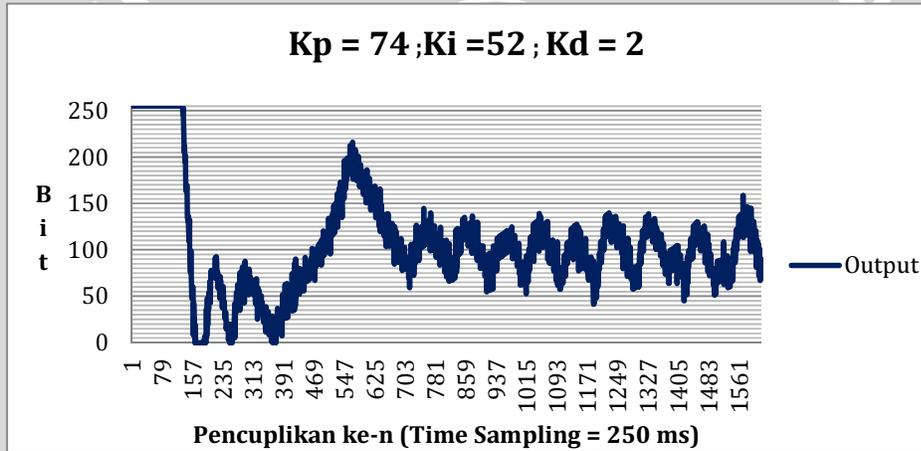
Gambar 5. 53 Grafik OUTPUT Pengujian ke - 11

Pada percobaan kesebelas nilai, Kp, Ki dan Kd yang diberikan secara berurutan adalah 74,52,1. Dalam grafik input terhadap setpoint, karakteristik tanggapan *plant* (pemanas) terhadap nilai Kp pada setpoint 150° C yaitu, waktu naik (t_r) = 90, 9 detik, waktu puncak (t_p) = 93,1 detik, Waktu penetapan (t_s) = 102,3 detik. Maksimum overshoot (M_p) = 1,61 %. Sedangkan Gambar OUTPUT berupa grafik putaran kecepatan kipas bisa ditinjau dalam Gambar 5.53. Pada setpoint diatas 150° C, sistem cenderung agak stabil karena input tertinggal tidak terlalu jauh dari nilai setpoint. Keterangan lebih jelas dapat dilihat dalam Tabel analisis hasil pengujian

Pengujian ke – 12



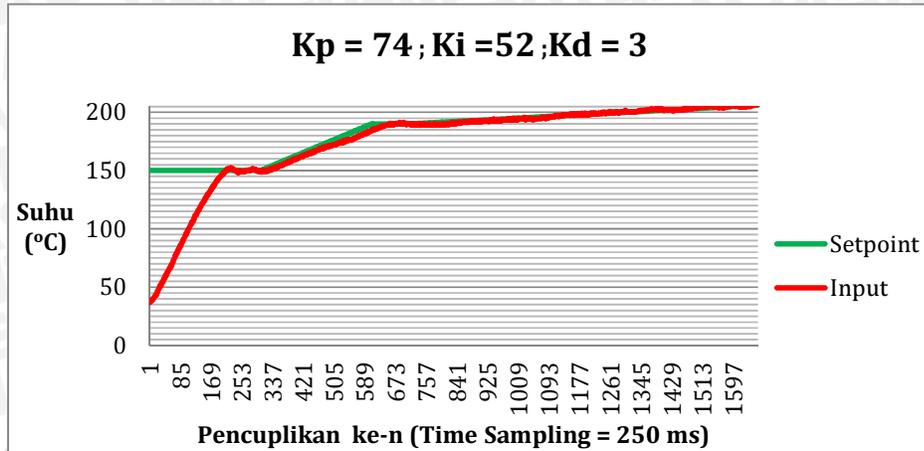
Gambar 5. 54 Grafik INPUT terhadap SETPOINT Pengujian ke - 12



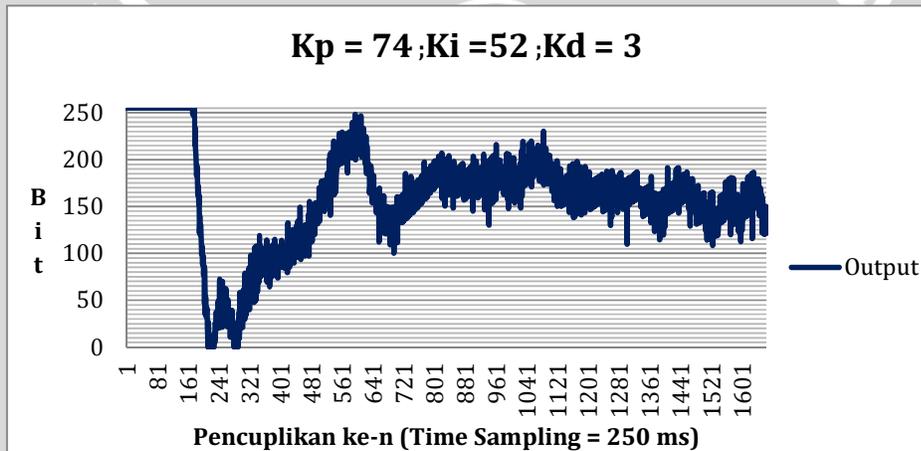
Gambar 5. 55 Grafik OUTPUT Pengujian ke - 12

Pada percobaan keduabelas nilai, Kp, Ki dan Kd yang diberikan secara berurutan adalah 74,52,2. Dalam grafik input terhadap setpoint, karakteristik tanggapan *plant* (pemanas) terhadap nilai Kp pada setpoint 150° C yaitu, waktu naik (t_r) = 73,35 detik, waktu puncak (t_p) = 78,75 detik, Waktu penetapan (t_s) = 86,55 detik. Maksimum overshoot (M_p) = 2,45 %. Sedangkan Gambar OUTPUT berupa grafik putaran kecepatan kipas bisa ditinjau dalam Gambar 5.55. Pada setpoint diatas 150° C, sistem cenderung agak stabil namun terjadi sedikit osilasi. Keterangan lebih jelas dapat dilihat dalam Tabel analisis hasil pengujian

Pengujian ke - 13



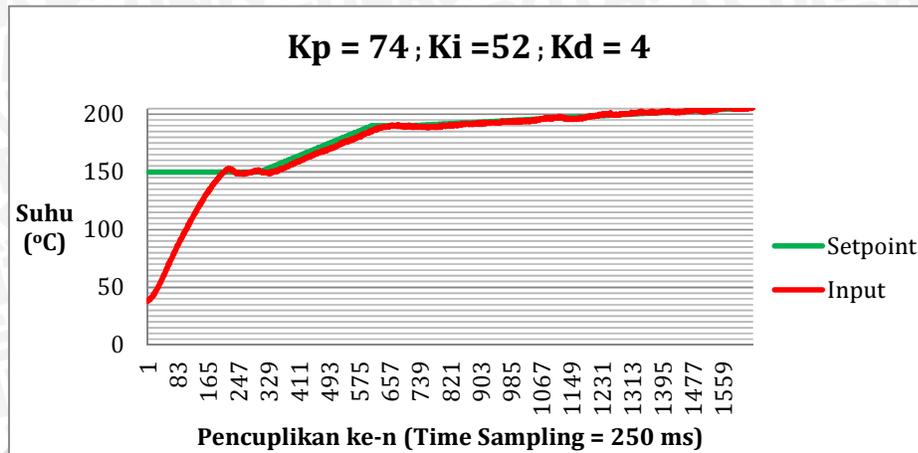
Gambar 5. 56 Grafik INPUT terhadap SETPOINT Pengujian ke - 13



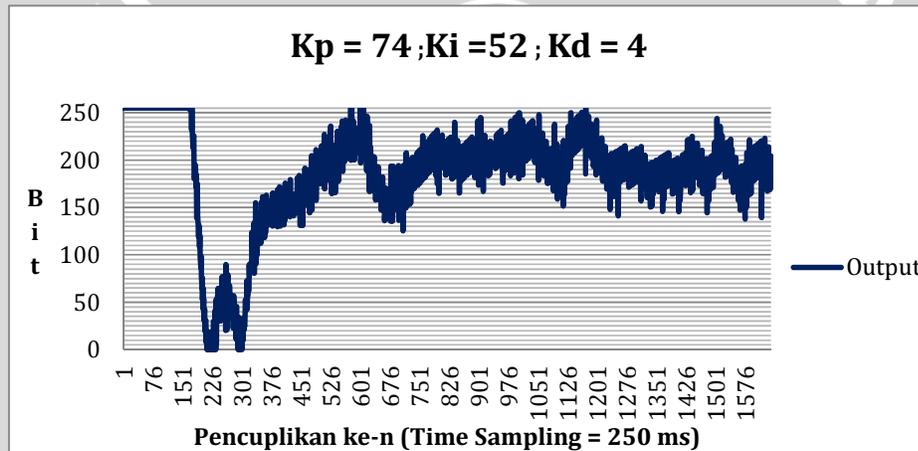
Gambar 5. 57 Grafik OUTPUT Pengujian ke - 13

Pada percobaan ketigabelas nilai, K_p , K_i dan K_d yang diberikan secara berurutan adalah 74,52,3. Dalam grafik input terhadap setpoint, karakteristik tanggapan *plant* (pemanas) terhadap nilai K_p pada setpoint 150° C yaitu, waktu naik (t_r) = 94,95 detik, waktu puncak (t_p) = 101,55 detik, Waktu penentuan (t_s) = 105,75 detik. Maksimum overshoot (M_p) = 1,61 %. Sedangkan Gambar OUTPUT berupa grafik putaran kecepatan kipas bisa ditinjau dalam Gambar 5.57. Pada setpoint diatas 150° C, sistem cenderung cukup stabil namun pada setpoint 150 – 190° C input tertinggal dari nilai setpoint. Keterangan lebih jelas dapat dilihat dalam Tabel analisis hasil pengujian

Pengujian ke - 14



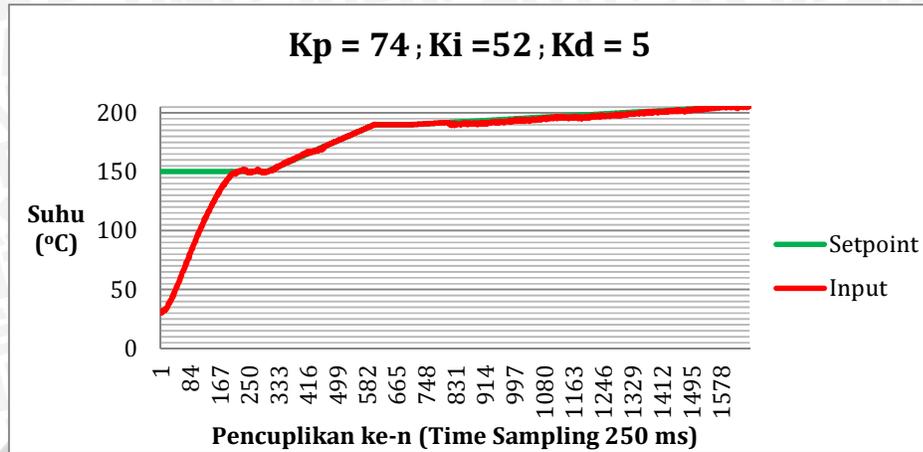
Gambar 5. 58 Grafik INPUT terhadap SETPOINT Pengujian ke - 14



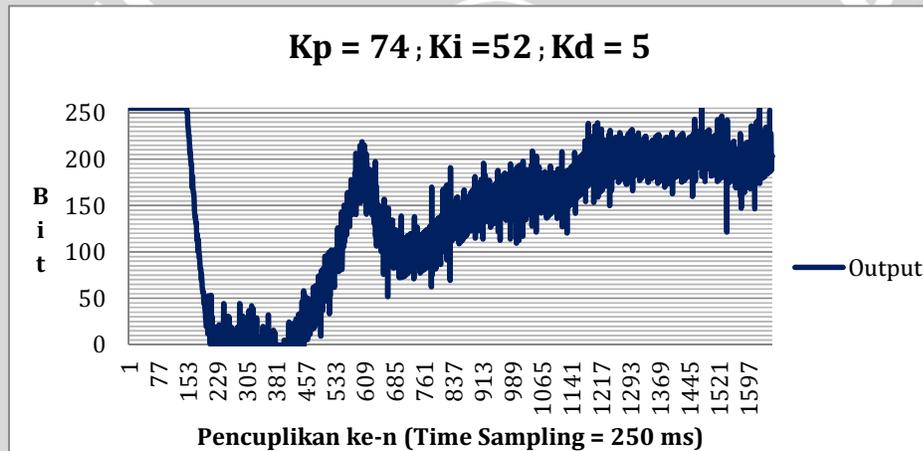
Gambar 5. 59 Grafik OUTPUT Pengujian ke - 14

Pada percobaan keempatbelas nilai, Kp, Ki dan Kd yang diberikan secara berurutan adalah 74,52,4. Dalam grafik input terhadap setpoint, karakteristik tanggapan *plant* (pemanas) terhadap nilai Kp pada setpoint 150° C yaitu, waktu naik (t_r) = 94,5 detik, waktu puncak (t_p) = 100,5 detik, Waktu penetapan (t_s) = 101,7 detik. Maksimum overshoot (M_p) = 2,03 %. Sedangkan Gambar OUTPUT berupa grafik putaran kecepatan kipas bisa ditinjau dalam Gambar 5.59. Pada setpoint diatas 150° C, sistem cenderung cukup stabil namun pada setpoint 150 – 190° C input tertinggal dari nilai setpoint. Keterangan lebih jelas dapat dilihat dalam Tabel analisis hasil pengujian.

Pengujian ke - 15



Gambar 5. 60 Grafik INPUT terhadap SETPOINT Pengujian ke - 15



Gambar 5. 61Grafik OUTPUT Pengujian ke - 15

Pada percobaan kelimabelas nilai, Kp, Ki dan Kd yang diberikan secara berurutan adalah 74,52,5. Dalam grafik input terhadap setpoint, 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 %. Sedangkan Gambar OUTPUT berupa grafik putaran kecepatan kipas bisa ditinjau dalam Gambar 5.61. Pada setpoint diatas 150° C, sistem cenderung sangat stabil dan nilai error cukup kecil. Keterangan lebih jelas dapat dilihat dalam Tabel analisis hasil pengujian.

5.4.5 Analisis Hasil Pengujian

Berdasarkan hasil beberapa kali percobaan didapatkan hasil seperti yang tercantum dalam Tabel 5.4. Dari hasil tersebut, didapat nilai terbaik untuk parameter Kp, Ki dan Kd yaitu berturut – turut adalah 74, 52, 5. Parameter tersebut didapatkan melalui proses *trial and error* dimana nilai Kp, Ki dan Kd dinaikan secara bertahap.

Tabel 5. 4 Analisis hasil pengujian parameter PID

Penguji an ke-	Parameter			Time rise (s)	Max overshoot		Time Settling (s)	Time to peak (s)	nilai max oversho ot	Error rata-rata
	Kp	Ki	Kd		%	setpoint				
1	20	0	0	101	1.61	150	116	107.6	2.42	0.71
	20	0	0		0.00	150-190				-3.41
	20	0	0		0.00	190				-6.27
	20	0	0		0.00	190-205				-9.27
2	40	0	0	94.95	2.45	150	111.75	103.95	3.67	0.01
	40	0	0		0.00	150-190				-3.89
	40	0	0		0.00	190				-8.27
	40	0	0		0.00	190-205				-11.32
3	60	0	0	102.6	1.61	150	112.8	106.8	2.42	0.19
	60	0	0		0.00	150-190				-5.33
	60	0	0		0.00	190				-12.22
	60	0	0		0.00	190-205				-13.18
4	75	0	0	96.75	1.61	150	108.75	100.65	2.42	0.06
	75	0	0		0.00	150-190				-6.00
	75	0	0		0.00	190				-10.13
	75	0	0		4.74	190-205		260	9.7	-5.82
5	80	0	0	92.7	2.03	150	108.9	99.3	3.04	0.15
	80	0	0		0.00	150-190				-7.30
	80	0	0		0.00	190				-8.51
	80	0	0		0.00	190-205				-8.45
6	75	10	0	88.65	2.45	150	104.45	97.25	3.67	-0.41
	75	10	0		1.13	150-190	73.8	69.6	1.86	-0.74
	75	10	0		1.27	190	24.6	13.2	2.42	0.89
	75	10	0		2.61	190-205	405.5	397	5.3	-1.60
7	75	20	0	83.7	2.45	150	102.9	100.9	3.67	-0.17
	75	20	0		1.05	150-190	3.6	0.6	1.57	-0.64
	75	20	0		0.62	190	58.8	54	1.17	-1.72
	75	20	0		3.51	190-205	401.5	397.5	7.14	-9.33
8	75	30	0	87.75	2.45	150	99.15	95.55	3.67	-0.45
	75	30	0		1.35	150-190	16.2	12	2.03	-1.77
	75	30	0		0.94	190	50.4	47.4	1.79	-1.43
	75	30	0		4.93	190-205	293.5	280.5	9.83	-9.72
9	75	40	0	89.5	2.86	150	104.5	96.7	4.29	0.27

	75	40	0	0.63	150-190	3	0.6	0.95	-1.74	
	75	40	0	0.00	190				-3.13	
	75	40	0	1.26	190-205	428	421	2.57	-0.11	
	75	50	0	86.4	2.03	150	99.8	91.8	3.04	0.11
10	75	50	0	0.63	150-190	1.8	0.6	0.95	-3.02	
	75	50	0	0.00	190				-2.94	
	75	50	0	2.17	190-205	215.5	205.5	4.23	0.09	
	74	52	1	90.9	1.61	150	102.3	93.1	2.42	-0.12
11	74	52	1	0.73	150-190	3.3	1.2	1.17	-4.43	
	74	52	1	0.73	190	50.4	41.4	1.17	-1.11	
	74	52	1	1.22	190-205	326.5	315	2.44	-0.25	
	74	52	2	73.35	2.45	150	86.55	78.75	3.67	0.14
12	74	52	2	1.16	150-190	67.8	66.6	1.9	-1.81	
	74	52	2	0.00	190				-3.27	
	74	52	2	1.61	190-205	231.5	225	2.41	0.11	
	74	52	3	94.95	1.61	150	105.75	101.55	2.42	0.25
13	74	52	3	0.00	150-190				-3.72	
	74	52	3	0.62	190	52.8	45.6	1.17	-1.17	
	74	52	3	1.15	190-205	344	336	2.34	-0.21	
	74	52	4	94.5	2.03	150	101.7	100.5	3.04	0.18
14	74	52	4	0.21	150-190	1.8	0.6	0.32	-4.45	
	74	52	4	0.28	190	44.4	31.2	0.54	-0.98	
	74	52	4	1.13	190-205	215	204	2.31	-0.41	
	74	52	5	90.9	1.19	150	104.1	98.7	1.79	0.36
15	74	52	5	1.27	150-190	13.92	6.72	1.9	0.06	
	74	52	5	0.47	190	1.8	0.6	0.7	0.70	
	74	52	5	1.01	190-205	217	207	1.52	-1.20	

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, dipatikan nilai parameter K_p , K_i dan K_d yang mampu membuat *respond* sistem menjadi lebih handal dan mampu menyesuaikan karakteristik dari plant itu sendiri. Dengan nilai K_p , K_i , dan K_d berturut – turut adalah 74, 52, 5; didapatkan nilai maksimum *overshoot* (M_p) untuk setpoint 150°C , $150^\circ\text{C} - 190^\circ\text{C}$, 190°C , $190-205^\circ\text{C}$ 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.

Pengujian sistem secara keseluruhan

5.5 Pengujian sistem secara keseluruhan

5.5.1 Tujuan

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.

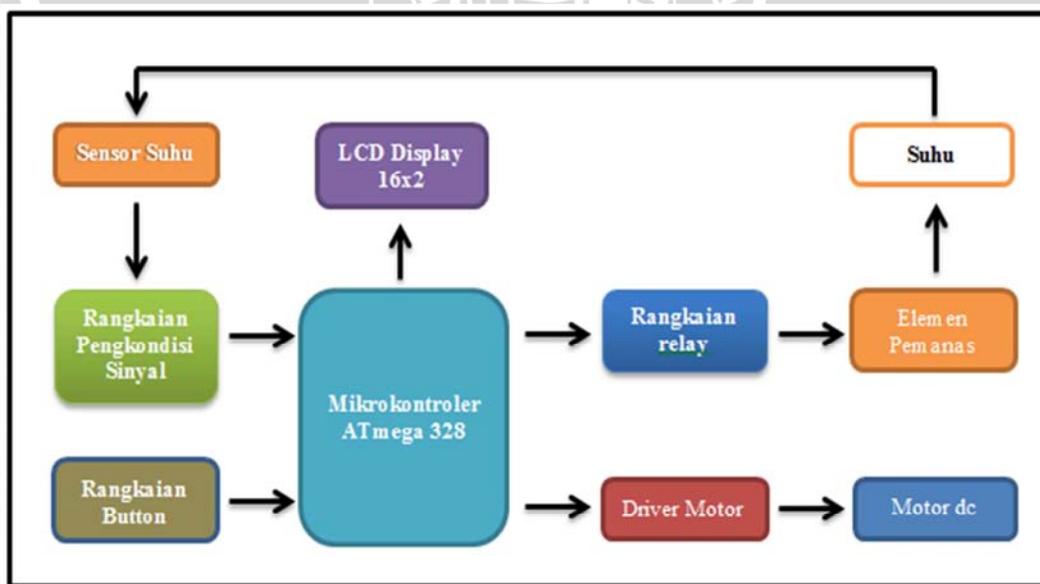
5.5.2 Peralatan

Peralatan yang digunakan pada pengujian ini adalah:

- 1) Sumber tegangan AC 220V / 1200 watt, DC 19V, DC 12V
- 2) 1 Buah Laptop
- 3) Minimum Sistem ATmega 328
- 4) LCD *Display* 16x2
- 5) Sensor suhu *thermocouple* jenis-k
- 6) Rangkaian amplifier suhu
- 7) Rangkaian Driver motor
- 8) Solid State Relays
- 9) Rangkain *switch* elemen pemanas
- 10) Rangkaian Button
- 11) Potensiometer 100 k Ω
- 12) Element pemanas dan *casing*
- 13) Motor DC dan *propeller* kipas angin

5.5.3 Prosedur Pengujian.

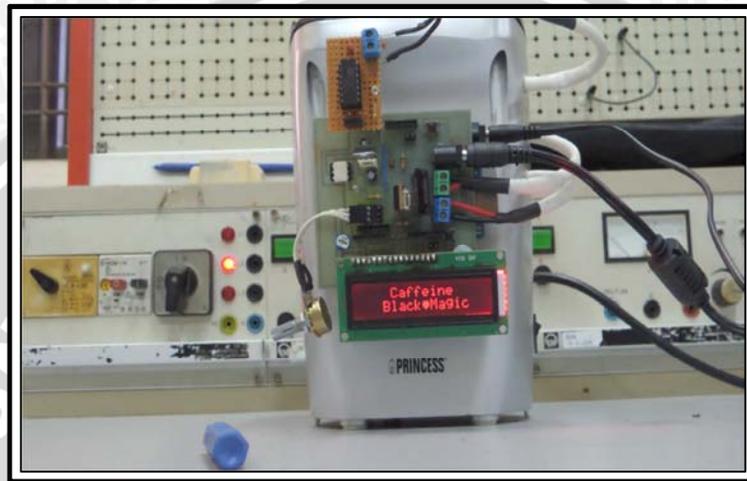
- 1) Merangkai rangkaian secara keseluruhan seperti dalam Gambar 5.62 sesuai dengan blok diagram pada bagian perancangan di Bab IV.
- 2) Menghubungkan komputer/laptop dengan sistem melalui USB.
- 3) Menyusun perangkat lunak menggunakan *software Arduino IDE 0022*, melakukan *compiling*, lalu melakukan *uploading* program ke mikrokontroler ATmega328. Perangkat lunak berisikan program secara keseluruhan sesuai dengan perancangan pada Bab IV.
- 4) Memasukan 60 gram biji kopi kedalam wadah yang telah ada pada alat
- 5) Mengaktifkan tampilan *graphical user Interface (GUI)* pada laptop untuk menampilkan grafik dan untuk *me-record history data*.
- 6) Menghubungkan sistem dengan semua catu daya yang diperlukan. Driver motor dengan catu daya 19V, Minimum Sistem ATMEGA 328 dengan catu daya 12V dan element pemanas dengan catu daya 220V/1200 Watt.
- 7) Memastikan bahwa daya yang digunakan untuk mencatu elemen pemanas adalah sebesar 1200 Watt. Karena jika dayanya tidak memenuhi maka elemen pemanas tidak akan pernah mencapai suhu maksimum dan proses *roasting* dipastikan gagal.
- 8) Menjalankan sistem sesuai dengan prosedur yang telah ditentukan sebelumnya.



Gambar 5. 62 Blok Diagram pengujian keseluruhan sistem

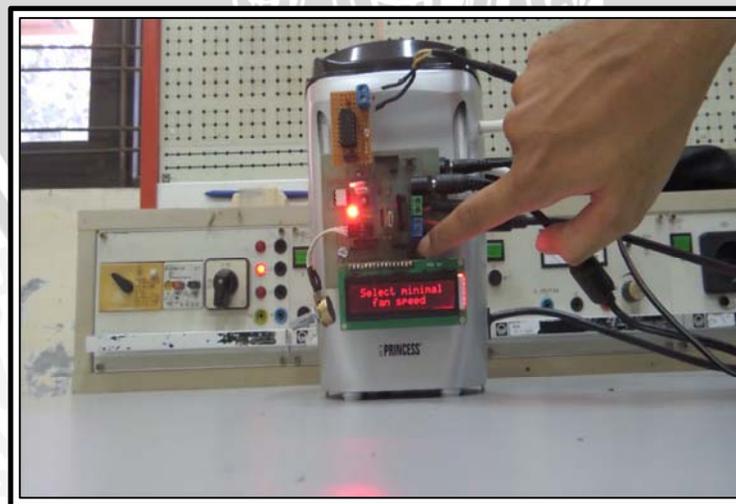
5.5.4 Hasil Pengujian dan Analisis

Pengujian keseluruhan dilakukan tahap demi tahap sesuai dengan prosedur kerja sistem. Langkah pertama yaitu menghidupkan sistem, LCD display akan menampilkan pesan selamat datang dan menunggu pengguna untuk menekan tombol seperti ditunjuk dalam Gambar 5.63.



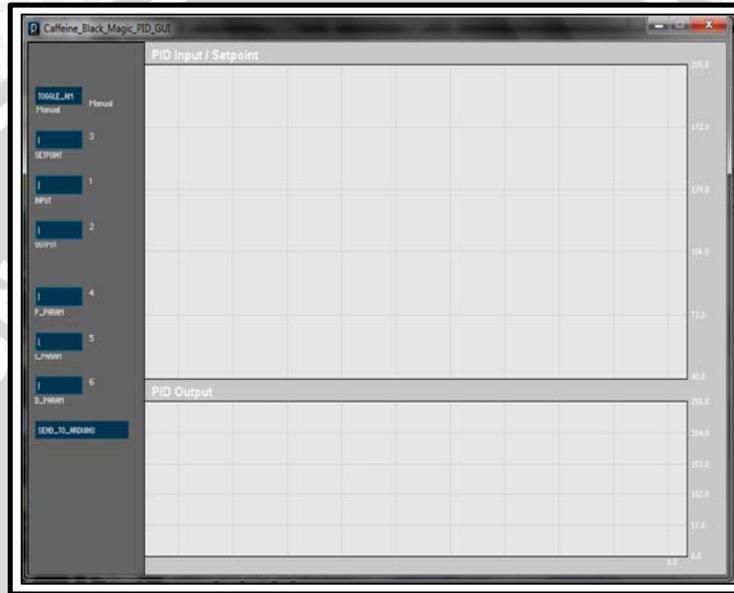
Gambar 5. 63 Tampilan LCD ketika sistem *start-up*

Selanjutnya setelah tombol ditekan, kipas angin akan menyala tetapi tidak dengan elemen pemanasnya. Selanjutnya, muncul tampilan untuk pengguna agar mengatur kecepatan kipas minimum melalui potensiometer seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 5.64. Pada pengujian kali ini kecepatan minimum di set pada kecepatan 34 – 35 % . Dari gambar terlihat bahwa LED indikator kecepatan kipas telah menyala.



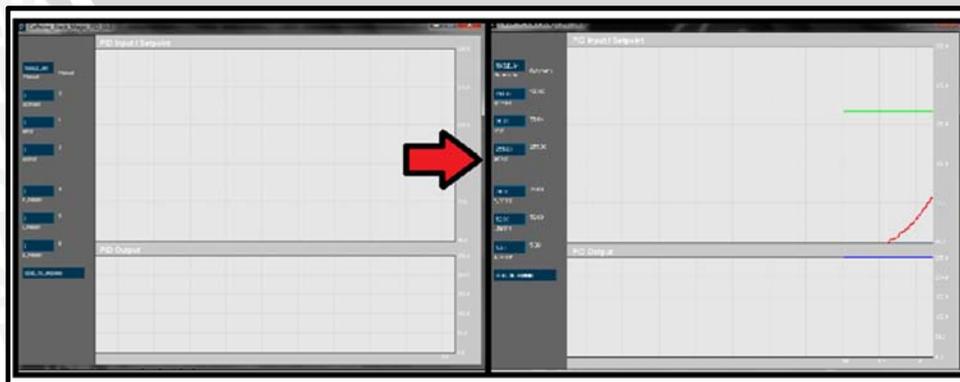
Gambar 5. 64 Tampilan LCD setelah tombol *start* ditekan untuk kali pertama

Selain sebagai indikator kipas telah menyala, intensitas nyala LED juga akan sesuai dengan kecepatan motor kipas. Pertanda kipas telah menyala, juga terdengar dari suaranya maupun dari biji kopi yang mulai bergerak. Selanjutnya tampilan GUI perlu diaktifkan untuk memantau grafik yang terjadi dan parameter – parameter PID yang ada ketika proses *roasting*. Adapun tampilan GUI ditunjukkan dalam Gambar 5.65. Proses *drawing* grafis statistik tidak akan dimulai sebelum tombol ditekan untuk kali kedua.



Gambar 5. 65 Tampilan GUI

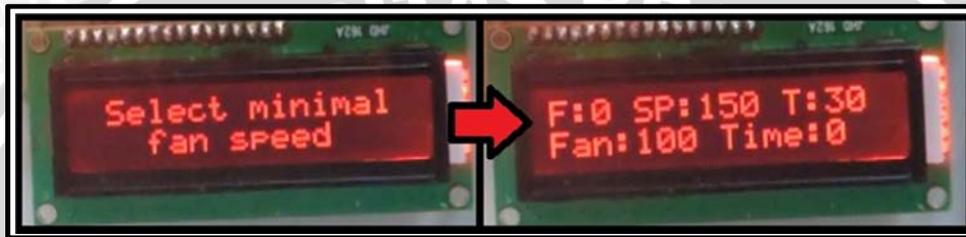
Ketika tombol ditekan lagi, yang terjadi ialah elemen pemanas akan menyala dan proses *roasting* telah dimulai. Sehingga tampilan dalam LCD akan berubah dan tampilan GUI akan mulai menggambar grafik input, output dan setpoint yang terjadi selama proses *roasting*. Proses aktifnya tampilan GUI ditunjukkan dalam Gambar 5.66.



Gambar 5. 66 Proses aktifnya GUI (*Graphical User Interface*)

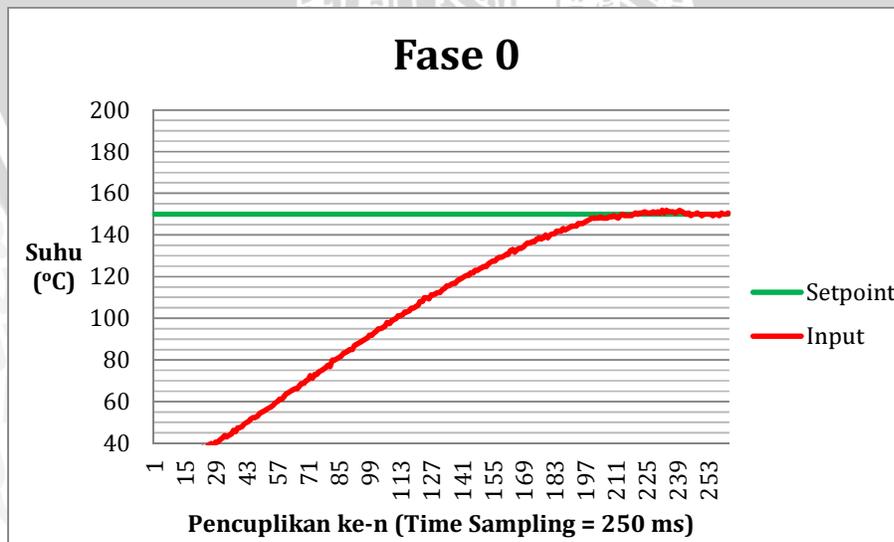
Perubahan tampilan LCD ditunjukkan dalam Gambar 5.67. LCD display akan menampilkan parameter – parameter yang dibutuhkan dalam proses *roasting*. Adapun penjelasan mengenai parameter tersebut adalah sebagai berikut:

- 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



Gambar 5. 67 Perubahan Tampilan LCD ketika menuju fase 0

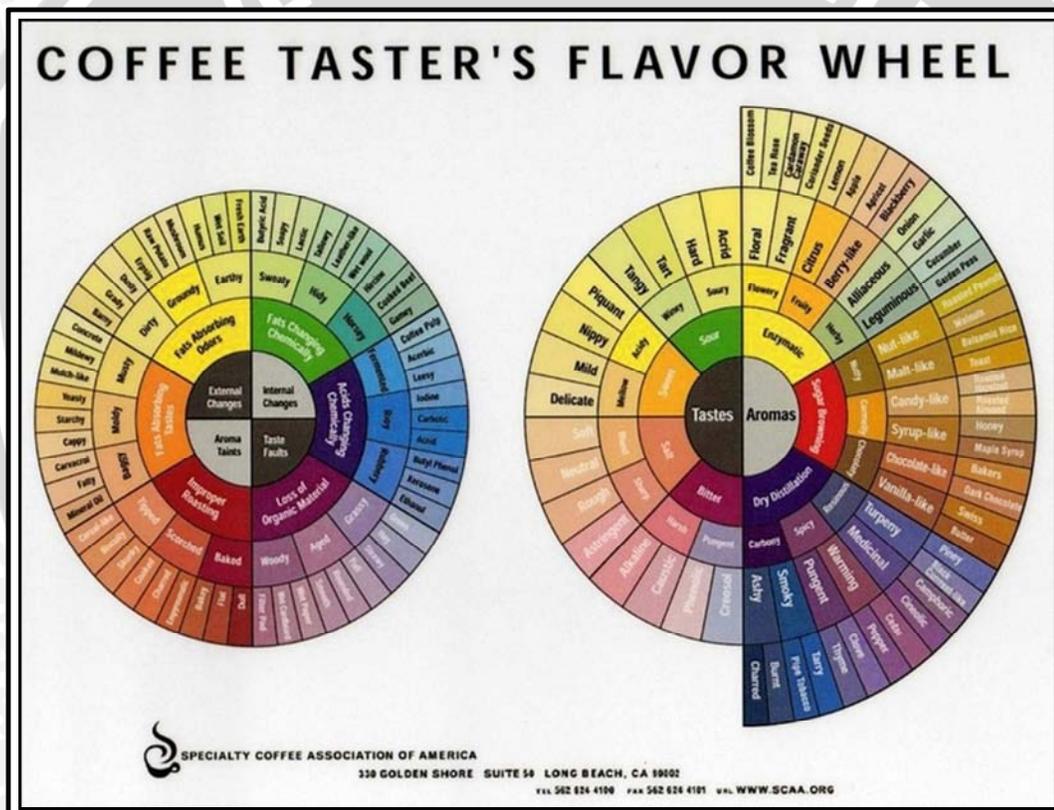
Fase 0 adalah fase yang terjadi pertama pada proses roasting. Pada fase ini kaidah yang digunakan adalah menaikkan suhu hingga 150° C. Artinya, setpoint diatur pada 150° C. Fase ini tidak memperhitungkan durasi waktu. Proses pemanasan yang berlangsung dapat ditunjuk dalam grafik dalam Gambar 5.68.



Gambar 5. 68 Grafik respon Suhu terhadap setpoint pada fase 0

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. Dan didapatkan nilai *Time rise* (Tr) sebesar 90,9 detik. Nilai overshoot yang ditoleransi dalam program adalah sebesar 1 *point* diatas nilai setpoint.

Jika biji kopi yang disangrai ingin hingga tahap *dark roast*, biji kopi harus dimasukan ketika fase ini. Namun jika ingin menghasilkan *roasted coffee* yang *brown roast* sebaiknya *greenbean* (biji kopi mentah) dimasukan ketika fase ini berakhir atau pada fase 1. Komponenen rasa yang diatur pada proses roasting didasarkan pada kaidah *flavor wheel* yang ditunjuk dalam Gambar 5.69.



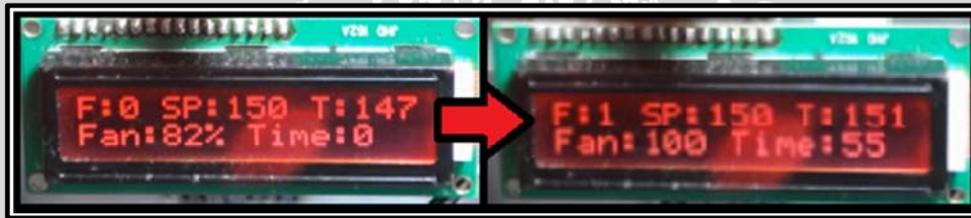
Gambar 5. 69 Flavor wheel

Pada pengujian ini, *greenbean* dimasukan pade 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 Gambar 5.70.

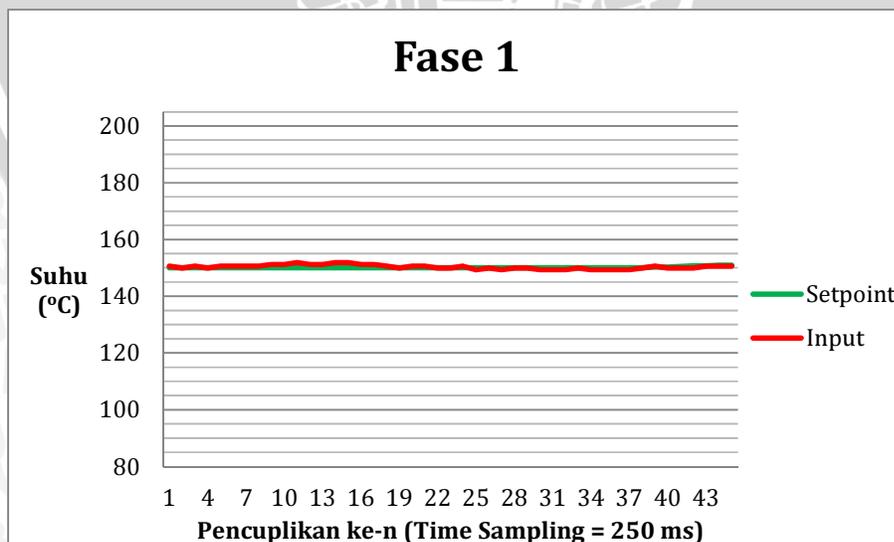


Gambar 5. 70 Perubahan warna *greenbean* akibat fase *yellowing*

Selanjutnya, sistem memasuki fase 1 dimana nilai *setpoint* di set pada suhu 150° C dan suhu dijaga tetap dalam kurun waktu 60 detik. Perubahan tampilan LCD dari fase 0 menuju fase ditunjukkan dalam Gambar 5.71. Pada fase ini penghitung mundur mulai aktif dengan durasi selama 60 detik.



Gambar 5. 71 Perubahan LCD display dari fase 0 ke fase 1



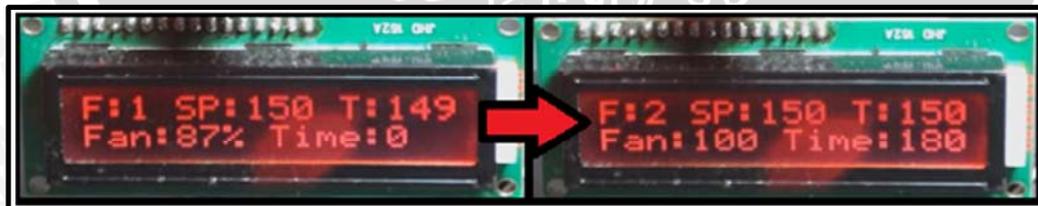
Gambar 5. 72 Grafik respon suhu terhadap setpoint pada fase 1

Dalam Gambar 5.72 terlihat bahwa respon sistem terlihat stabil. Pada fase ini didapatkan nilai *maximum overshoot* (M_p) sebesar 1,19 % , nilai *settling time* (T_s) sebesar 104,1 detik dan nilai *time to peak* (T_p) sebesar 98,7 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 Gambar 5.73. Jika *greenbean* memiliki kadar air berlebih, maka akan terdengar suara letupan.



Gambar 5. 73 Fase *steam* pada proses coffee roasting

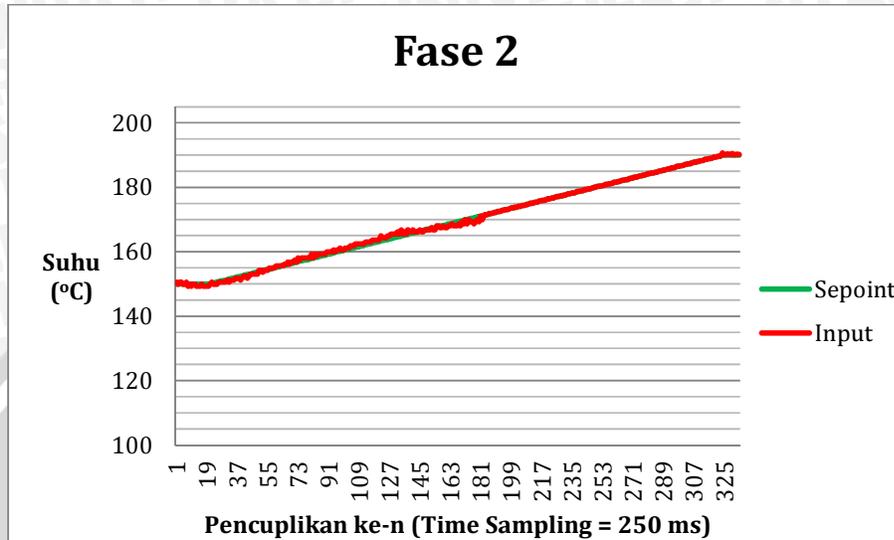
Lalu, ketika waktu penghitung mundur telah selesai menghitung selama 60 detik, maka sistem akan beralih menuju fase selanjutnya yaitu fase kedua. Pada fase ini suhu akan dinaikan secara bertahap dari 150°C menuju 190°C dalam durasi waktu 180 detik atau $13,3^{\circ}\text{C}/\text{menit}$. Perubahan tampilan pada layar LCD ditunjukkan dalam Gambar 5.74. Fase ini cukup signifikan dalam proses roasting itu sendiri karena banyak komponen rasa dari kopi yang dapat dimunculkan akibat terjadi proses *enzymatic*.



Gambar 5. 74 Gambar perubahan LCD display dari fase 1 ke fase 2

Proses *enzymatic* mempengaruhi aroma pada biji kopi. Aroma yang muncul dapat berupa buah – buahan, herbal maupun wangi bunga tertentu. Selain itu komponen rasa (*taste*) juga terpengaruh pada fase ini adalah yang berkaitan dengan rasa masam. Pada jenis biji kopi tertentu, dapat memunculkan sedikit rasa yang mirip dengan wine

(fermented). Respon karakteristik sistem, terbilang cukup stabil dan ditunjukkan dalam Gambar 5.75.



Gambar 5. 75 Grafik respon suhu terhadap setpoint pada fase 2

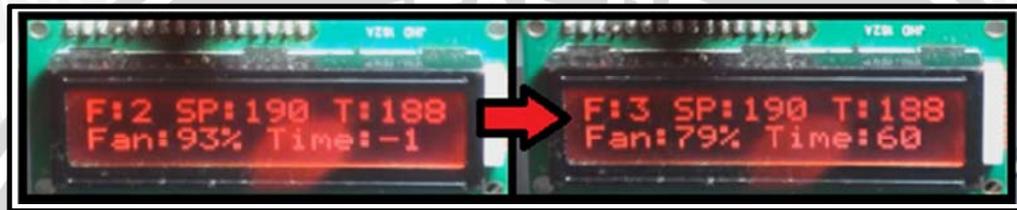
Pada fase ini didapatkan nilai *maximum overshoot* (M_p) sebesar 1,27 % , nilai *settling time* (T_s) sebesar 13,92 detik dan nilai *time to peak* (T_p) sebesar 6,72 detik. Ketika parameter K_i dan K_d proporsinya kurang pas, respond sistem akan menjadi terlalu lambat sehingga nilai input tertinggal dari nilai setpoint dan Hal tersebut akan berdampak pada biji kopi yang disangrai tidak mampu menonjolkan ciri khas komponen rasa original dari biji kopi itu sendiri. Pada akhir dari fase ini, kopi yang tersangrai melalui fase *light brown stage*, Proses pada fase *light brown stage* ditunjukkan dalam Gambar 5.76.



Gambar 5. 76 Fase *light brown stage* pada proses coffee roasting

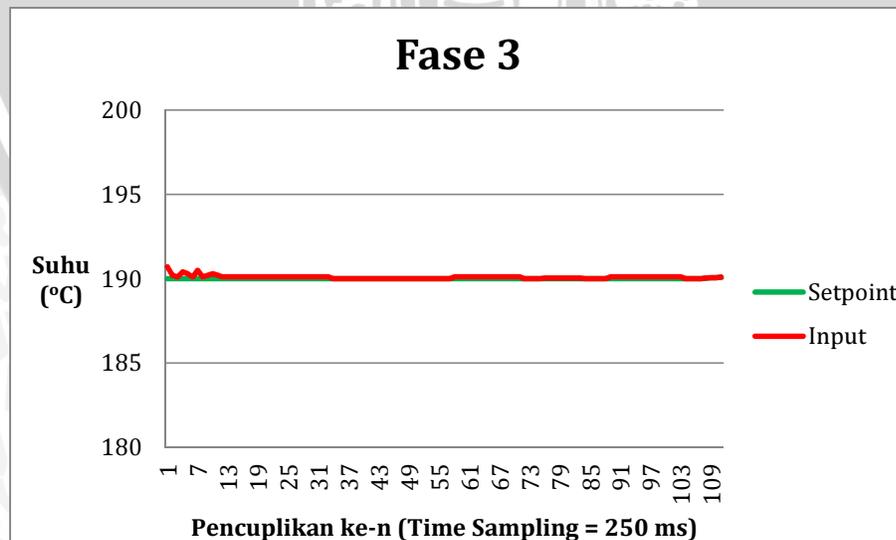
Fase *light brown stage* ditandai dengan ukuran biji kopi yang mulai terlihat mengembang karena adanya retakan cukup lebar pada setiap biji kopi dan warna biji kopi berubah menjadi coklat terang.

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. Perubahan tampilan pada LCD ditunjukkan dalam Gambar 5.77.



Gambar 5. 77 Gambar perubahan LCD display dari fase 2 ke fase 3

Terkait dengan proses *roasting* pada fase ini, komponen aroma yang dipengaruhi adalah dikenal dengan istilah *sugar browning*. Aroma tersebut antara lain adalah kacang – kacangan, karamel dan coklat. Sedangkan variabel rasa yang terkait pada tahap ini adalah yang berkaitan dengan rasa manis. Sedangkan perihal respon karakteristik sistem, terbilang sangat stabil dan ditunjukkan dalam Gambar 5.78.



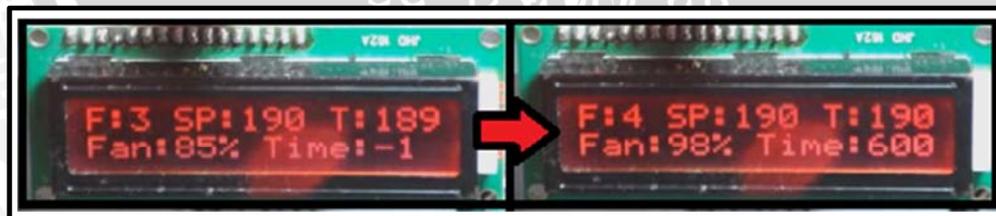
Gambar 5. 78 Grafik respon suhu terhadap setpoint pada fase 3

Pada fase ini didapatkan nilai *maximum overshoot* (M_p) sebesar 0,47 % , nilai *settling time* (T_s) sebesar 1,8 detik dan nilai *time to peak* (T_p) sebesar 0,6 detik. Pada akhir dari fase ini, kopi yang tersangrai melalui fase *brown stage*, dimana warna dari biji kopi terlihat berwarna coklat tua. Warna coklat ini merupakan proses reaksi gula dalam kandungan biji kopi. Proses pada fase *brown stage* ditunjukkan dalam Gambar 5.79.



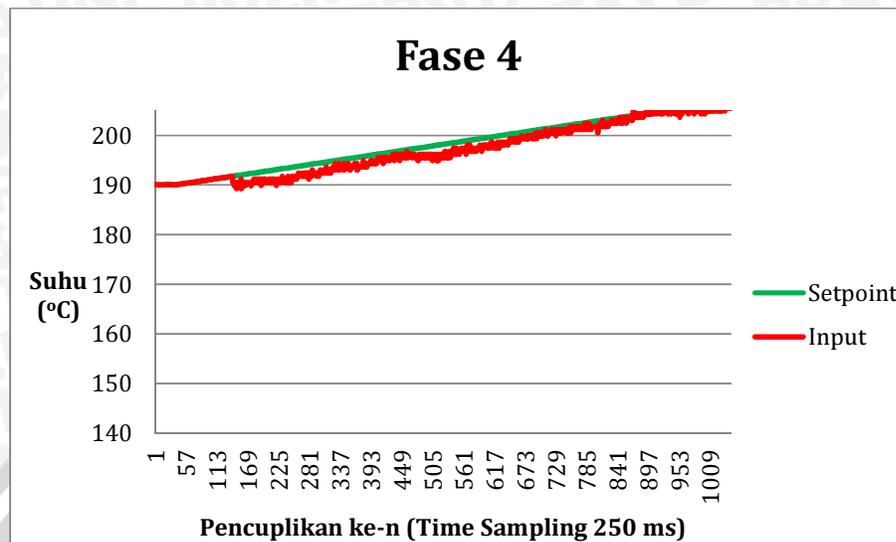
Gambar 5. 79 Fase *brown stage* pada proses coffee roasting

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. Perubahan tampilan pada LCD ditunjukkan dalam Gambar 5.80. Terlampaui lama pada fase ini, akan membuat biji kopi yang disangrai akan menjadi gagal karena terlampaui hingga tahap *fully carbonized* atau dengan kata lain (gosong) hanya tersisa arang. Adapun komponen rasa dan aroma yang diatur pada fase ini meliputi rasa asin dan pahit; serta aroma karbon, bumbu maupun resin. Untuk biji kopi



Gambar 5. 80 Gambar perubahan LCD display dari fase 3 ke fase 4

yang digunakan sebagai *espresso* (kopi ekstrak) tentunya fase inilah yang perlu diperhatikan karena untuk mengatur tingkat rasa pahit. Tetapi dalam pengujian ini proses *roasting* akan dihentikan ketika memasuki fase *first crack*. Perihal respon karakteristik sistem, terbilang cukup stabil dan ditunjukkan dalam Gambar 5.81.



Gambar 5. 81 Grafik respon suhu terhadap setpoint pada fase 4

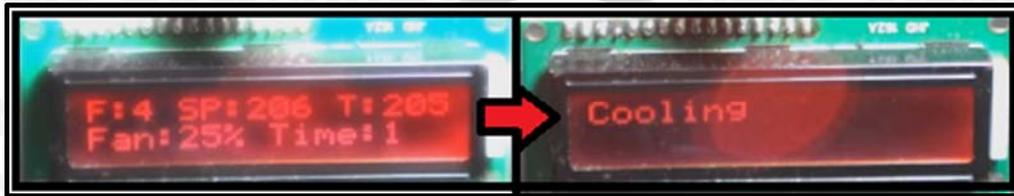
Pada fase ini didapatkan nilai *maximum overshoot* (M_p) sebesar 1,01 % , nilai *settling time* (T_s) sebesar 217 detik dan nilai *time to peak* (T_p) sebesar 207 detik. Pada akhir dari fase ini, kopi yang tersangrai melalui tahap *first crack*, dimana tercium bau harum dari biji kopi. Segera setelah 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. Untuk para pemula disarankan agar berhenti pada titik ini, dikarenakan untuk meneruskan ke fase *second crack* cukup sulit bagi pemula. Proses pada fase *first crack* ditunjukkan dalam Gambar 5.82



Gambar 5. 82 Fase *first crack* pada proses *coffee roasting*

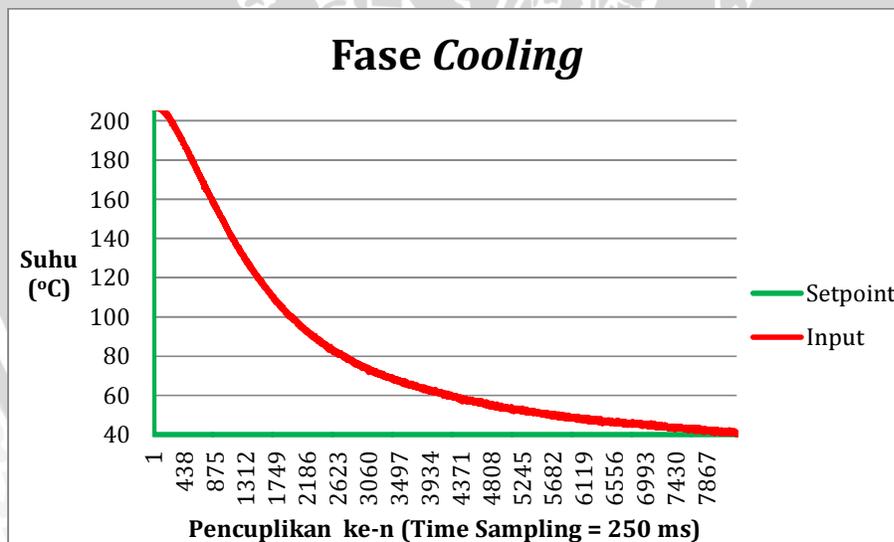
Saat suhu sudah mencapai 205° C atau lebih dan waktu penghitung mundur telah berahir, sistem akan menjalankan fase pendinginan. Pada fase ini setpoint di atur pada

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 Gambar 5.83.



Gambar 5. 83 Gambar perubahan LCD display dari fase 4 ke fase *cooling*

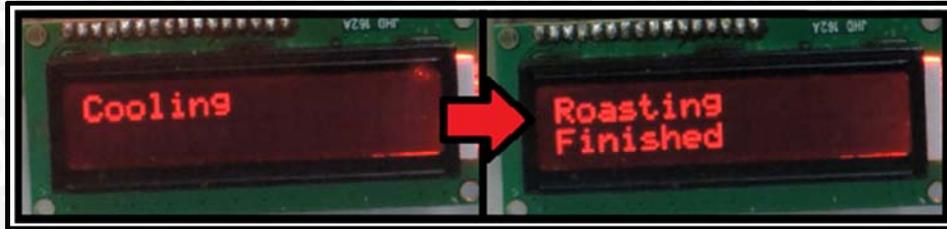
Pada fase *cooling* sistem sudah tidak lagi melakukan control secara perhitungkan melainkan hanya menggunakan sistem switch dimana kecepatan motor putaran kipas di set maksimum dan elemen heater dimatikan, sehingga suhu dapat diturunkan secara drastis dalam waktu singkat. Mengenai respon karakteristik sistem, ditunjukkan dalam Gambar 5.84.



Gambar 5. 84 Grafik respon suhu terhadap *setpoint* pada fase *cooling*

Ketika suhu sudah turun di titik 40° C, maka sistem akan berhenti. Pada kondisi ini proses *roasting* dapat dikatakan sepenuhnya berakhir dan biji kopi hasil penyangraian (*roasted coffee*) sudah siap untuk dibawa kepada proses selanjutnya. Perubahan tampilan pada LCD dari fase *cooling* menuju *finish* ditunjukkan dalam Gambar 5.85.

Secara keseluruhan sistem telah berjalan sesuai dengan harapan karena telah berjalan sesuai dengan yang ada di perancangan. Proses *roasting* telah berakhir dan biji kopi siap untuk diolah pada proses selanjutnya.



Gambar 5. 85 Gambar perubahan LCD display dari fase 4 ke fase *cooling*

5.6 Pengujian cita rasa kopi yang dihasilkan sistem melalui prosedur *coffee cupping test* melalui standar protokol *Speciality Coffee Association of America* (SCAA)

5.6.1 Tujuan

Pengujian cita rasa kopi ini bertujuan untuk:

1. Mengetahui sebaik apakah mutu roasted *coffee* yang dihasilkan oleh sistem. (Merupakan pengujian yang bersifat kualitatif)
2. Mengetahui apakah ada cacat rasa dan bagaimana intensitasnya.
3. Mengetahui bagaimana karakteristik rasanya (*aroma, flavor, body, acidity* dan *aftertaste*)

5.6.2 Peralatan

Berikut adalah beberapa peralatan dan kriteria menurut SCAA:

1. Gelas/ mangkuk :
 - Tipe gelas/mangkuk ukuran 5 atau 6 *ounce Manhattan* atau gelas keramik. Mangkuk soup porselin 175 – 225 ml juga diperbolehkan.
 - Gelas/mangkuk harus bersih, tanpa bau/aroma yang kentara/jelas pada suhu ruang.
 - Tutup dapat terbuat dari bahan apapun.
 - Mangkuk soup porselin 175 –225 ml juga diperbolehkan.
 - Semua Gelas/mangkuk yang digunakan harus mempunyai volume, dimensi dan bahan pembuatan yang sama.

2. Air :
 - Tidak terkontaminasi baik bau maupun warna.
 - Tidak terkontaminasi bahan kimia penjernih.
 - Mengandung mineral: 100 –200 ppm.
 - Suhu: 90 -100C.
3. Sendok :
 - Sendok yang bermulut bundar dan cekung, agar mudah menyeruput.
 - Logam yang terbaik dari bahan stainless steel atau perak.
4. Perebus air :
 - Terbuat dari stainless steel agar tidak tercemar bau logam.
5. Penggiling/ *grinder* :
 - Dilengkapi dengan pengatur kehalusan partikel kopi
 - Terbuat dari bahan stainless steel
6. Air kumur :
 - Untuk penetral mulut dibutuhkan air kumur
 - Sebaiknya digunakan air kumur yang hangat

5.6.3 Prosedur Pengujian

Berikut adalah beberapa prosedur sebelum dan ketika menjalani sesi *coffee cupping* yang harus dipenuhi berdasarkan protocol SCAA:

1. Persiapan contoh :
 - Contoh seharusnya disangrai dalam waktu 24 jam sebelum uji citarasa, namun masih diperbolehkan paling tidak 8 jam sebelum diuji
 - Tingkat penyangraian seharusnya antara penyangraian warna muda (light) hingga warna muda-sedang (light-medium), diukur dengan M-Basic (*gourmet*) *Agtron Scale* sekitar skala 58 Basic (*Gourmet*) *Agtron Scale* sekitar skala 58 pada kopi sangrai dan skala 63 setelah digiling, +/-1 skala (55-60 pada skala standard atau Agtron/skala penyangraian SCAA #55).
 - Penyangraian seharusnya selesai sempurna tidak kurang dari 8 menit dan tidak lebih dari 12 menit

- Contoh seharusnya tidak hangus. dan seharusnya segera didinginkan dengan aliran udara dingin (tidak diperbolehkan pendinginan dengan air).
 - Ketika contoh sudah sempurna dingin sampai suhu ruangan (sekitar 75° F atau 20° C), contoh kopi sangrai harus disimpan dalam wadah atau kantung yang tertutup rapat, tidak tembus udara sampai saat uji citarasa dilakukan, ini untuk meminimumkan kontak dengan udara dan mencegah kontaminasi.
 - Contoh terkemas harus disimpan dalam tempat yang dingin dan gelap, tetapi bukan dalam *refrigerator* (almari es) atau dibekukan.
2. Penetapan pengukuran :
- Rasio optimum adalah 8.25 gram kopi untuk setiap 150 ml air, sebab rasio ini sesuai dengan titik tengah dari resep keseimbangan optimum untuk seduhan terbaik (*Golden Cup*).
 - Tetapkan volume air dalam gelas atau mangkuk uji cita rasa terpilih dan sesuaikan berat kopi pada rasio +/- 0.25 sesuaikan berat kopi pada rasio / 0.25 gram.
3. Persiapan *coffee cupping* :
- Contoh harus digiling segera sesaat sebelum uji cita rasa, tidak lebih dari 15 menit sebelum penambahan air panas. Jika hal ini tidak mungkin, contoh harus ditutup dan penambahan air tidak lebih dari 30 menit setelah penggilingan.
 - Contoh harus ditimbang sebagai kopi sangrai untuk menentukan rasio kopi/air untuk volume seduhan yang tepat.
 - Ukuran partikel kopi hasil penggilingan harus sedikit lebih kasar dari pada yang biasa digunakan untuk pembuatan kopi pada metode seduhan tetes saringan kertas (*drip*), dengan 70% sampai 75 % partikel dapat lewat saringan ukuran 20 mesh (Standar Amerika Serikat).
 - Paling sedikit 5 mangkuk/cangkir dari tiap-tiap contoh harus disiapkan untuk mengevaluasi keseragaman contoh.
 - Masing-masing mangkuk/cangkir contoh harus digiling dengan melewati lebih dahulu contoh yang sama untuk “mencuci” grinder, dan kemudian penggilingan dilakukan pada masing-masing mangkuk

secara individu, tampung masing mangkuk secara individu, tampung dalam mangkuk yang bersih secara individu pula, untuk menjamin jumlah dan hasil penggilingan yang konsisten.

- Tutup segera mangkuk/gelas setelah penggilingan.

4. Penuangan air panas :

- Air yang digunakan untuk uji cita rasa harus bersih, bebas dari bau, tetapi bukan air destilasi atau air yang disuling. Idealnya, kadar padatan terlarut total adalah 125-175 ppm, tetapi harus tidak kurang dari 100 ppm, dan tidak lebih dari 250 ppm.
- Air harus hasil dari pemanasan adalah air segar dan ketika dituangkan pada kopi harus memiliki suhu sekitar 200° F atau 93° C. Suhu harus disesuaikan dengan ketinggian tempat.
- Air panas harus dituang langsung ke bibir cangkir yang berisi bubuk kopi. Pastikan bahwa semua bubuk kopi telah basah. Biarkan seduhan panas bubuk kopi telah basah tidak diaduk selama 3-5 menit sebelum pengujian.

5. Evaluasi contoh :

- Tidak ada satu pengujianpun yang dapat secara efektif untuk semua tujuan tersebut, tetapi metode ini dapat mencapai aspek-aspek umum dari tujuan tersebut.
- Sangat penting bagi evaluator/panelis untuk tahu maksud dari pengujian dan penggunaan hasilnya.
- Maksud dari pedoman uji cita rasa ini adalah penentuan dari persepsi panelis / *cupper* terhadap kualitas.
- Kualitas dari atribut *flavor* khusus dianalisa, dan kemudian dikenalkan/digambarkan pada panelis/*cupper* sebelum pengujian.
- Contoh dinilai pada skala *numeric*. Skor antar contoh kemudian dapat dibandingkan. Kopi yang mempunyai skor lebih tinggi harus dicatat lebih baik dari pada kopi yang mempunyai skor lebih rendah.

6. Form uji citarasa sebagai alat penampung catatan-catatan penting atribut flavor/citarasa kopi.

- *Fragrance/aroma, Flavor, aftertaste, acidity, body, balance, uniformity, clean cup, sweetness, defects, dan overall*. Atribut *flavor* khusus ini

adalah skor positif dari cita rasa, yang merefleksikan tingkat penilaian dari panelis/*cupper*.

- Defect/cacat adalah skor negatif yang menandakan sensasi cita rasa tidak enak.
- Skor *overall* didasari pada pengalaman cita rasa dari panelis/*cupper* individu sebagai penilaian personal.
- Di dalam skala penilaian ini ada 16-point yang menggambarkan tingkat kualitas, dengan peningkatan seperempatan point, antara nilai numerik 6 sampai 9.

5.6.4 Hasil Pengujian

Berikut adalah langkah – langkah yang di lakukan sebagai prosedur evaluasi

1. Contoh/*sample* pertama-tama harus diamati warna hasil sangrainya. Hal ini ditandai pada lembaran dan mungkin dapat digunakan sebagai referensi selama penilaian dari atribut cita rasa khusus. Proses ini ditunjukkan dalam Gambar 5.86.



Gambar 5. 86 Proses pengamatan terhadap warna kopi hasil penyangraian

2. Tahap penilaian berikutnya terhadap atribut citarasa, didasari pada perubahan pada perubahan - perubahan persepsi citarasa yang disebabkan oleh penurunan suhu kopi.

5.6.4.1 Tahap 1 – *Fragrance* / Aroma

1. Dalam 15 menit setelah contoh digiling/digrinding, *fragrance* kering contoh harus dievaluasi dengan mengangkat mangkuk dan menghirup bau bubuk kering seperti yang ditunjuk dalam Gambar 5.87.



Gambar 5. 87 Proses mencium aroma *fragrance* kering

2. Setelah diseduh air panas, permukaan lapisan bubuk kopi dibiarkan selama paling tidak 3 menit dan tidak lebih dari 5 menit seperti yang ditunjuk dalam Gambar 5.88.



Gambar 5. 88 Penyeduhan air panas menggunakan teko dari bahan khusus

3. Pecah/*break* permukaan lapisan bubuk kopi dilakukan dengan mengaduk 3 kali, kemudian biarkan bubuk dan busa kopi turun, bersamaan dengan itu bagian belakang sendok dihirup baunya seperti dalam Gambar 5.89.



Gambar 5. 89 Proses mencium bagian belakang sendok untuk mencium bau protein

5.6.4.2 Tahap 2 - *Flavor, aftertaste, acidity, body, dan balance*

1. Ketika contoh telah dingin sampai suhu 71° C, dalam waktu 8-10 menit setelah penyeduhan, evaluasi seduhan harus dimulai.



Gambar 5. 90 Proses *slurping*

2. Seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 5.90, seduhan dimasukkan ke dalam mulut dengan cara diseruput (*slurping*) agar dapat menutup permukaan

mulut seluas mungkin, utamanya adalah lidah dan bagian atas mulut atas mulut. Karena uap *netro nasal* sedang pada intensitas maksimum pada suhu tersebut. *flavor* dan *aftertaste* dapat dinilai pada titik tersebut.

3. Selama seduhan kopi beranjak dingin (160°F – 140°F), maka yang dievaluasi *acidity*, *body* dan *balance*.
4. *Balance* adalah penilaian panelis/cupper seberapa bagus *flavor*, *aftertaste*, *acidity*, dan *body* bersama sesuai dalam kombinasi yang sinergis.
5. *Prefference* panelis/cupper untuk atribut yang berbeda, dievaluasi beberapa kali pada suhu yang berbeda (2 – 3 kali) sampai seduhan menjadi dingin.
6. Untuk menilai contoh pada skala 16-point, lingkari pada garis tanda yang sesuai pada *form* uji cita rasa.
7. Jika perubahan harus dilakukan (Jika contoh memperoleh atau kehilangan suatu mutu cita rasa karena perubahan suhu), tandai kembali membuat garis horizontal dan berilah tanda panah, sebagai tanda arah perubahan ke skor terakhir.

5.6.4.3 Tahap 3 - *Sweetness, uniformity, dan cleanliness*.

1. Ketika seduhan mendekati suhu ruang (kurang dari 100°F), maka *sweetness*, *uniformity*, dan *cleanness* dapat segera dievaluasi. Proses ini ditunjukkan dalam Gambar 5.92.



Gambar 5. 91 Proses evaluasi terakhir

2. Untuk atribut-atribut ini, panelis/cupper membuat penilaian pada masing-masing / 2 mangkuk/gelas, dengan penilaian 2 point tiap mangkuk/gelas (skor maksimum adalah 10 point).

- Evaluasi terhadap seduhan harus dihentikan ketika suhu contoh mendekati 71° F (21° C), dan skor overall ditentukan oleh panelis/cupper dan ditetapkan sebagai “*cupper’s points*”, yang didasari pada kombinasi semua atribut.

6.5.4.4 Tahap 4 – Skoring

- Setelah evaluasi contoh, semua skor ditambahkan, sebagai gambaran dalam seksi “scoring” di bawah, dan *final score* ditulis di bagian kanan atas kotak *score* ditulis di bagian kanan atas kotak form.

Green Appearance	Sample Code	Roast	Fragrance Aroma	Defects Intensity (I): 1-3	Acidity	Body	Flavor	Aftertaste	Overall ¹
Grade: 1 2 3 4 5 Moisture: 10% Dark green, like moldy, whole saurs, lots of silverskin, ~Typica V.	I/WP (1)	1		0 x 6 = 0	0 5 10 0 5 10 0 5 10		floral		16
Grade: 1 2 3 4 5 Moisture: 10% Dk. green, blue mold splits, whites, 17-18 green ~Typica V.	I/WP (2)	1		1 x 6 = 6	0 5 10 0 5 10 0 5 10		green, astringent		-6
Grade: 1 2 3 4 5 Moisture: 10% Dk green, less defects, wide range of sizes, polished More Bourbon like	I/WP (3)	1	Little popping	0 x 6 = 0	0 5 10 0 5 10 0 5 10		green astringent		12 1/2
Grade: 1 2 3 4 5 Moisture: 9% Reg. green, 2 Moldy, 1 ear 1 green, size: 18 -> small	I/WP (4)	1		0 x 6 = 0	0 5 10 0 5 10 0 5 10				16 1/2

¹ Overall = Defects Score + (Acidity + Body)/2 + Flavor + Aftertaste
Defect Score : Bernilai 0 atau negatif

Gambar 5.92 Contoh pengisian form SCAA cupping test

5.6.5 Analisis hasil pengujian

Setelah melakukan *cupping test* dengan standar SCAA terhadap biji kopi hasil penyangraian (*roasted coffee*) produk dari sistem, kopi dinilai berkualitas cukup baik karena tidak ditemui komponen rasa yang rusak (*defect*), namun tingkat *bitter*-nya (pahit) masih sedikit terlalu menonjol sehingga beberapa komponen rasa lain menjadi kurang dominan. Ternyata, hal itu diakibatkan oleh wadah penyangraian yang terlalu kecil sehingga proses *endothermic* pada biji kopi menjadi lebih tinggi. Sehingga nilai suhu pada proses *roasting* di setiap fase perlu dikurangi.