

PENGENDALIAN SUHU MENGGUNAKAN KONTROLER PID PADA PROTOTIPE MESIN PENGERING FLUIDISASI GABAH

Aurelia Ketawang Tunjung Laksmi^{*)}, Trias Andromeda, dan Aris Triwiyatno

Departemen Teknik Elektro, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Sudharto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang 50275, Indonesia

^{*)}E-mail: aurelia.tawang@gmail.com

Abstrak

Alat pengering tipe fluidisasi Laboratorium Proses Departemen Teknik Kimia Universitas Diponegoro menggunakan metode *on-off* sebagai kontroler suhu. Kontroler *on-off* memiliki kelemahan yaitu respon sistem yang kurang bagus sehingga sistem memiliki error yang besar. Alat pengering tipe fluidisasi Laboratorium Proses Departemen Teknik Kimia Universitas Diponegoro memiliki *error* pengaturan suhu hingga $\pm 2^\circ$ Celsius. Pada penelitian ini, digunakan metode PID pada sistem pengendalian suhu mesin pengering fluidisasi. Sensor *thermocouple* tipe K digunakan sebagai pengukur suhu udara dan hasil pengukuran dioperasikan menggunakan modul MAX6675. Keypad 3x4 digunakan sebagai masukan untuk memerikan nilai referensi dan tampilan pengendalian ditampilkan pada display LCD 16x2. Mikrokontroler ATmega16 digunakan sebagai pengendali pusat, di mana kontrol PID digunakan sebagai metode pengendalian. Pengujian dilakukan pada simulator sederhana dengan setrika sebagai elemen pemanas dan kipas sebagai penyebar panas. Metoda penalaan Ziegler-Nichols 1 menghasilkan parameter $K_p = 14,9$, $T_i = 188$ dan $T_d = 47$. Pengujian dilakukan dengan nilai referensi tetap 40°C , dinaikkan dari 40°C ke 42°C , diturunkan dari 40°C ke 35°C , dan diberi gangguan. Ketika diberi gangguan, sistem dapat mengendalikan tanggapan keluaran hingga mencapai nilai stabil. Unjuk kerja pengendalian suhu pada simulator pengering gabah menunjukkan hasil yang baik yaitu deviasi pengendalian suhu menurun dari $\pm 2^\circ\text{C}$ menjadi $\pm 0,60^\circ\text{C}$.

Kata kunci:, sensor *thermocouple* tipe K sensor, mikrokontroler ATmega16, metoda kontrol PID

Abstract

Fluidized dryer from Process Laboratory of Chemical Engineering Department Universitas Diponegoro uses on-off controller to control the drying temperature. Despite the convenience, on-off controller yields a large error. Fluidized dryer in Process Laboratory of Chemical Engineering Department Universitas Diponegoro has error up to $\pm 2^\circ$ Celsius. In this research, PID controller is used to control temperature of fluidized dryer. Thermocouple type K sensor measures the air temperature and the measurement will be processed by MAX6675. Keypad 3x4 is used to input the reference value and displayed using LCD 16x2. Microcontroller ATmega16 is used as central controller unit with PID control method. The experiment was conducted with simple simulator with clothes iron as the heating element and a fan as heat distributor. The Ziegler-Nichols 1 tuning method obtained parameters which are $K_p = 14,9$, $T_i = 188$ and $T_d = 47$. The experiment was done with reference value 40°C , increased from 40°C to 42°C , decreased from 40°C to 35°C , and given noise. When noise was given, the system could control the outcome respond until it reached steady state. The result of temperature controlling on dryer simulator shows a good performance which is the decreased deviation from $\pm 2^\circ\text{C}$ to $\pm 0,60^\circ\text{C}$.

Keywords: K type thermocouple sensor, microcontroller ATmega16, PID control method

1. Pendahuluan

Tanaman padi setelah dipanen secara umum memiliki kadar air cukup tinggi sekitar 20-23% basis basah saat musim kering dan sekitar 24-27% basis basah saat musim hujan [1]. Di Indonesia, gabah yang akan digiling sesuai kebutuhan pasar dikeringkan terlebih dahulu hingga kadar air mencapai maksimal 14% basis basah [2]. Proses

pengeringan ini dilakukan untuk mengawetkan beras sehingga beras dapat disimpan dalam waktu yang lama.

Telah dikembangkan berbagai macam alat pengering (*dryer*) untuk mempermudah proses pengeringan gabah, contohnya pengering tipe rak, *rotary*, fluidisasi atau dengan pembekuan (*freeze*). Masing-masing tipe pengering memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing, sesuai kebutuhan pengeringan yang dipengaruhi

kapasitas dan bahan yang hendak dikeringkan. Walau pun alat pengering memiliki metode pengeringan yang bermacam-macam, metode-metode tersebut belum cukup untuk mengoptimalkan proses pengeringan.

Berbagai penelitian telah dilakukan untuk mengoptimalkan proses pengeringan. Penelitian Wongrat pada [3] berfokus pada kualitas produk hasil, sedangkan Kudra pada [4] berfokus pada konsumsi energi dengan mengembangkan alat pintar pendeteksi rasio kinerja pengering konveksi. Baker dan McKenzie pada [5] selain mempertimbangkan konsumsi energi juga mempertimbangkan panas dan listrik dari pengering semprot industri (*industrial spray dryers*). Penelitian Olmos pada [6] menggabungkan model matematika untuk menentukan temperatur udara dan kelembaban relatif sebagai fungsi waktu. Tetapi belum ada yang fokus meneliti pengaturan kestabilan temperatur udara panas pada proses pengeringan.

Laboratorium Proses Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Diponegoro memiliki beberapa alat pengering, salah satunya alat pengering fluidisasi (*fluidized dryer*). Alat pengering tipe fluidisasi Laboratorium Proses Departemen Teknik Kimia Universitas Diponegoro menggunakan metode *on-off* sebagai kontroler suhu. Kontroler *on-off* memiliki kelemahan yaitu respon sistem yang kurang bagus, terutama pada sistem yang memiliki rentang *error* yang kecil. Alat pengering tipe fluidisasi Laboratorium Proses Departemen Teknik Kimia Universitas Diponegoro memiliki *error* pengaturan suhu hingga $\pm 2^\circ$ Celsius.

Penelitian oleh Gürel pada [7] menggunakan metode kontrol PID sebagai kontroler mesin *fluidized bed dryer* untuk memperkecil *error* pengaturan suhu hingga $\pm 0,36^\circ\text{C}$. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa pengaplikasian kontroler PID pada mesin pengering dapat memperkecil *error* pengendalian suhu. Pada penelitian ini, digunakan metode PID untuk mengontrol suhu pengukuran elemen pemanas berupa setrika sebagai elemen pemanas dan kipas DC sebagai penyebar panas. Diharapkan hasil perancangan kontroler PID tersebut dapat diterapkan pada mesin pengering fluidisasi Laboratorium Proses Departemen Teknik Kimia Universitas Diponegoro agar suhu tetap stabil pada nilai *set point* yang ditetapkan.

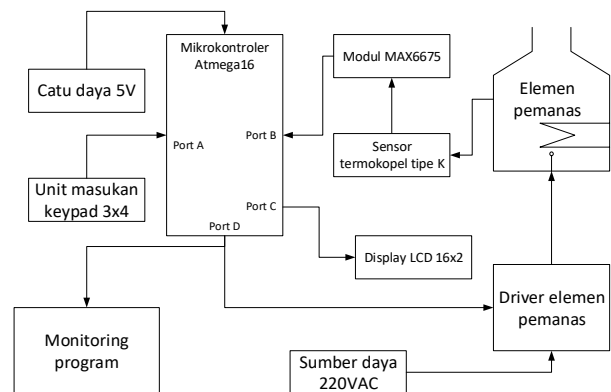
2. Metode

2.1. Perancangan Hardware Sistem Pengontrolan Suhu Mesin Pengering

Hardware sistem Pengontrolan Suhu Mesin Pengering terbagi menjadi lima bagian utama sebagai berikut :

1. Mikrokontroler ATmega16.
2. Sensor suhu termokopel tipe K dengan konverter berupa modul MAX6675.
3. Tampilan LCD 16x2.
4. Unit masukan keypad 3x4.
5. Driver heater berupa rangkaian *dimmer* dengan MOSFET IRFP4242.

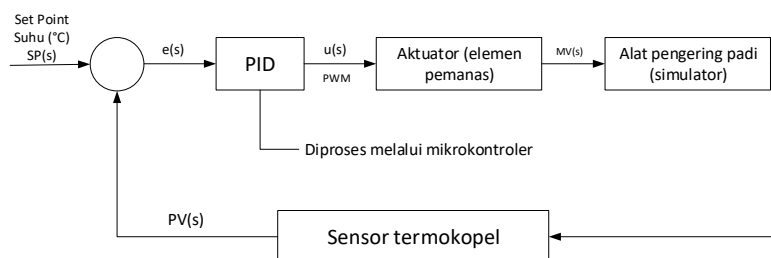
Gambar 1 menunjukkan blok diagram sistem Pengontrolan Suhu Mesin Pengering.



Gambar 1. Blok Diagram Sistem Pengontrolan Suhu Mesin Pengering

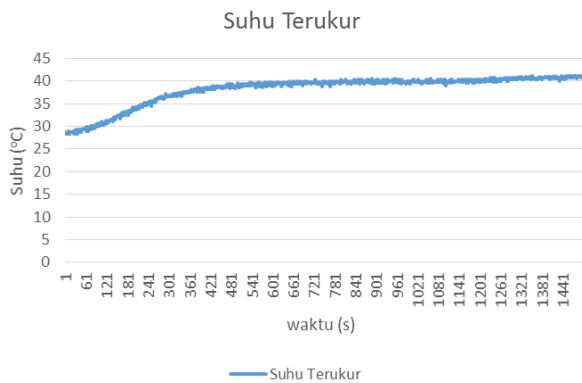
2.2. Perancangan Kontrol PID

Kontrol PID digunakan untuk mengatur suhu elemen pemanas sesuai dengan referensi yang diinginkan yaitu antara 35°C hingga 42°C (sesuai dengan *range* suhu yang digunakan dalam proses pengeringan fluidisasi). Penentuan parameter kontrol PID (K_p , T_i dan T_d) dilakukan melalui eksperimen *bump test* dengan mengirimkan perubahan sinyal u (*step*) secara manual oleh operator. Gambar 2 menunjukkan blok diagram perancangan kontrol PID.

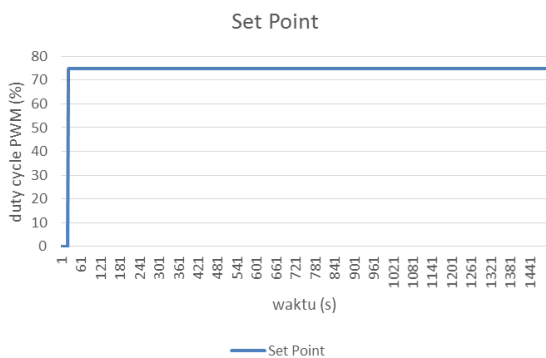


Gambar 2. Diagram Blok Perancangan Kontrol PID.

Eksperimen *bump test* pada perancangan kontrol PID dilakukan dengan mengirimkan perubahan nilai u dari 0% menjadi 75% melalui masukan *keypad*. Eksperimen diujikan pada simulator sederhana yang menggunakan setrika sebagai elemen pemanas. Eksperimen *bump test* pada perancangan ini dilakukan pada kondisi suhu awal elemen pemanas 28,8°C. Hasil dari *eksperimen bump test* dengan perubahan u dari 0% menjadi 75 % ditunjukkan pada Gambar 3.



a. Output Suhu dari Eksperimen Bump Test.



b. Perubahan u dari 0% menjadi 75%.

Gambar 3. Hasil Dari Eksperimen Bump Test Dengan Perubahan u Dari 0% Menjadi 75 %.

Dari Gambar 3 a. dapat dilihat bahwa *output* proses bersifat stabil (dapat mencapai kondisi *steady* ketika diberi perubahan nilai u) sehingga *model* proses yang digunakan merupakan *model self regulating* atau *model FOPDT*. Dari *model FOPDT* didapatkan parameter sebagai berikut:

1. Waktu keterlambatan transportasi (L) = 94 detik.
2. Waktu proses (T) = 198 detik.
3. *Gain* statis proses (K) = 0,17.

Berdasarkan ketiga parameter FOPDT yang diperoleh, dapat ditentukan nilai dari parameter kontrol PI menggunakan metoda *Ziegler Nichols 1* sebagai berikut :

$$1. Kp = \frac{1,2.T}{K.L} \quad (1)$$

$$= \frac{1,2.198}{0,17.94} = 14,92$$

$$2. Ti = 2.L = 2.94 \quad (2)$$

$$= 188$$

$$3. Td = 0,5.L = 0,5.94 = 47 \quad (3)$$

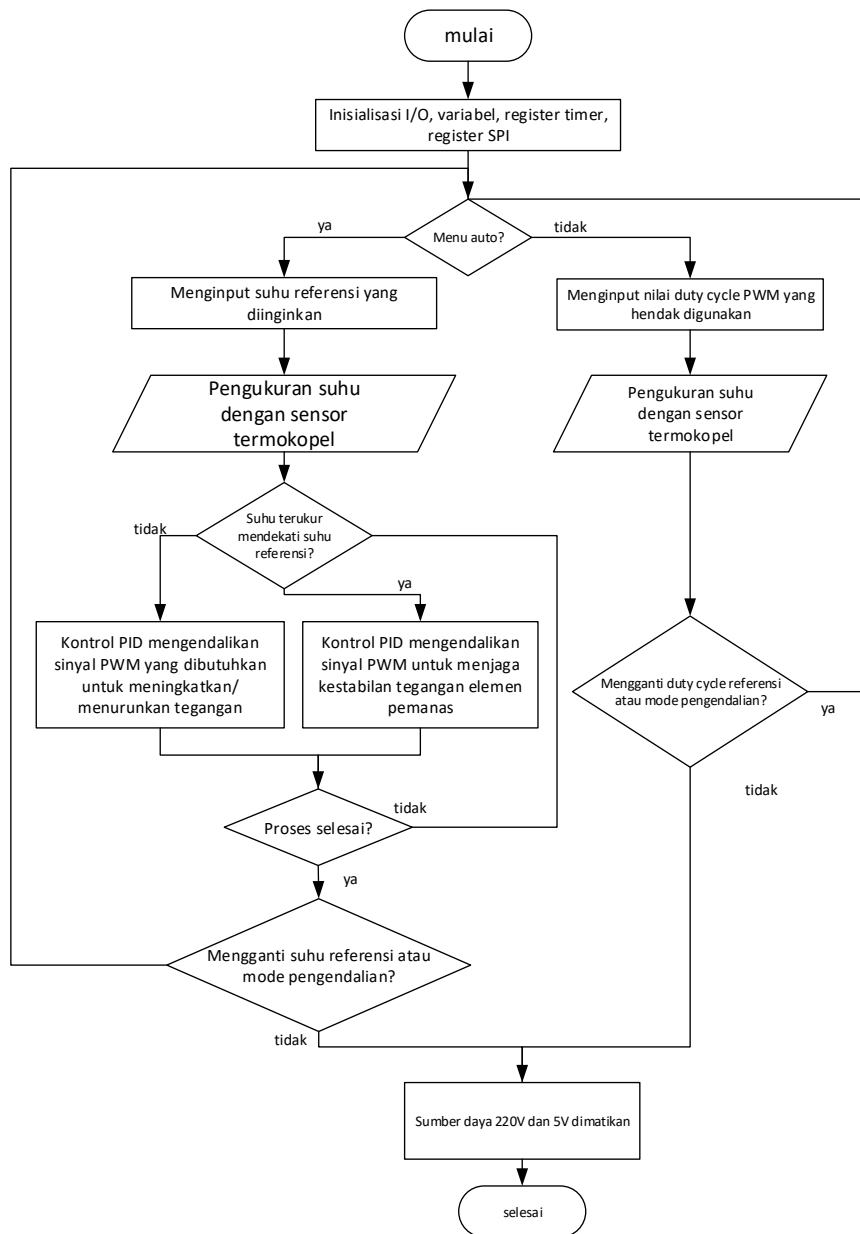
2.3. Perancangan Software Sistem Pengendalian Suhu

Program sistem pengendalian suhu mesin pengering gabah dimulai dengan melakukan inisialisasi *input output port-port*, inisialisasi variabel, inisialisasi register timer dan SPI pada mikrokontroler. Menu pertama akan menyajikan pilihan pengendalian yang hendak digunakan operator alat. Tombol “*” digunakan untuk memilih menu pengendalian manual sedangkan tombol “#” digunakan untuk memilih menu pengendalian otomatis.

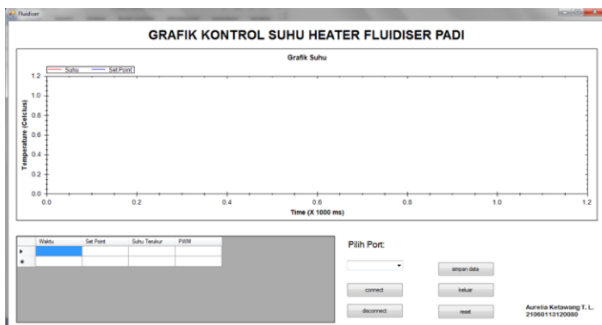
Pada pengendalian manual, operator memasukkan nilai *duty cycle* PWM yang hendak digunakan. Selama menjalankan menu *input* nilai referensi pengendalian manual atau otomatis, tombol “*” digunakan untuk memasukkan ulang nilai referensi dan tombol “#” digunakan untuk melanjutkan ke menu pengendalian dengan nilai referensi yang sudah ditetapkan. Selama pengendalian manual, nilai *duty cycle* PWM yang dimasukkan digunakan untuk mengendalikan tegangan elemen pemanas. Semakin besar sinyal PWM yang diberikan pada *optocoupler* maka tegangan keluaran *drain* pada MOSFET semakin besar.

Sedangkan pada pengendalian otomatis, nilai suhu referensi akan diolah oleh mikrokontroler menggunakan kendali PID. Keluaran kendali PID dikonversi menjadi sinyal PWM yang digunakan dalam pengendalian tegangan elemen pemanas. Tombol “*” digunakan untuk keluar dari menu pengendalian manual atau otomatis menuju menu pertama. Untuk menghentikan proses pengendalian, sumber tegangan 220V AC dan 5V DC dimatikan.

Hasil pengukuran dan pengendalian suhu mesin pegering dapat ditinjau melalui aplikasi *monitoring*. Aplikasi *monitoring* akan menunjukkan grafik *real time* dari proses pengendalian. Hasil pengukuran dapat disimpan dalam dokumen yang kompatibel dengan aplikasi *Microsoft Excel*. Operator dapat memilih *port serial* mana yang akan digunakan dalam peninjauan pengendalian suhu mesin pengering. Gambar 4 menunjukkan diagram alir sistem pengendalian suhu mesin pengering gabah sedangkan gambar 5 menunjukkan tampilan aplikasi *monitoring* sistem pengendalian suhu mesin pengering gabah.



Gambar 4. Diagram Alir Keseluruhan dari sistem pengendalian suhu mesin pengering gabah.



Gambar 5. tampilan aplikasi *monitoring* sistem pengendalian suhu mesin pengering gabah

3. Hasil dan Analisa

3.1. Pengujian Sensor dan Driver

3.1.1. Pengujian Sensor *Thermocouple*

Pengujian pembacaan sensor *Thermocouple* dilakukan dengan membandingkan pembacaan suhu antara sensor *Thermocouple* dengan termometer digital. Hasil pengujian sensor suhu *Thermocouple* ditunjukkan pada Tabel 1.

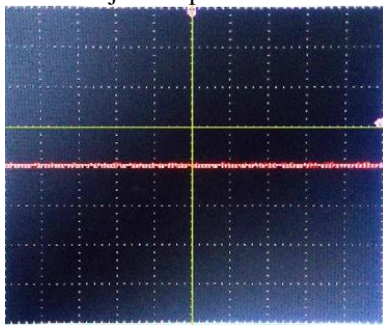
Tabel 1. Pengujian Sensor Suhu Thermocouple.

No.	Suhu termometer (°C)	Sensor thermocouple (°C)	Error (°C)
1	26,8	27,1	0,3
2	29,9	30,2	0,3
3	33,5	33,6	0,1
4	36,9	37,25	0,35
5	38,9	39,3	0,4
6	40,7	41	0,3
7	42	42,5	0,5
8	43,2	43,62	0,42
9	44,7	44,9	0,2
10	45,2	45,7	0,5
Rata-rata error			0,337

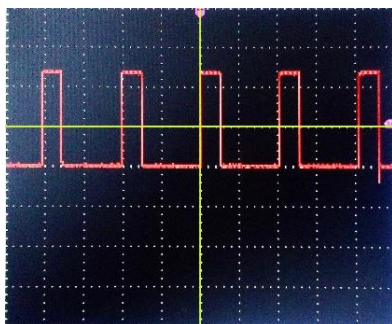
Berdasarkan hasil pengujian sensor suhu *Thermocouple* pada Tabel 1, dapat dilihat bahwa pembacaan suhu oleh sensor *Thermocouple* cukup akurat dengan rata-rata *error* pembacaan suhu adalah 0,337°C.

3.1.2. Pengujian Sensor Driver Elemen Pemanas

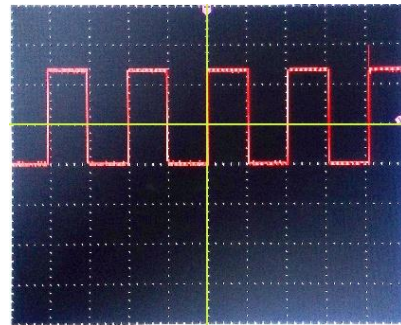
Pengujian *driver heater* dilakukan dengan memberikan variasi sinyal PWM dari mikrokontroler ke *driver heater* kemudian tegangan keluaran *driver heater* diukur. Pengamatan dilakukan dengan menggunakan osiloskop dan multimeter untuk mengetahui hasil sinyal PWM dan besar tegangan yang dikendalikan. Hasil pengujian dari driver heater dengan 5 variasi input PWM dapat dilihat pada Gambar 6, 7, 8, 9 dan 10. Hasil pengukuran tegangan keluaran *driver* ditunjukkan pada tabel 2.



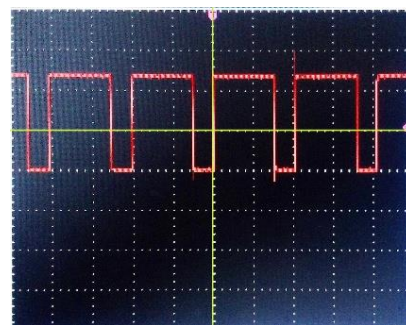
Gambar 6. sinyal PWM 1960 KHz duty cycle 0%, t/div 250ms, v/div 2V



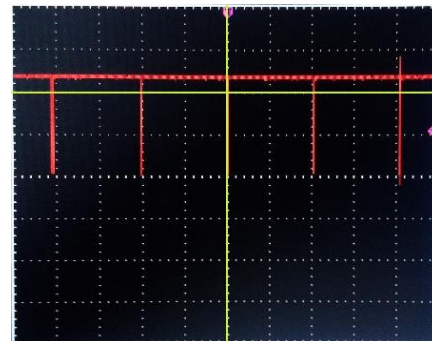
Gambar 7. sinyal PWM 1960 KHz duty cycle 25%, t/div 250ms, v/div 2V



Gambar 8. sinyal PWM 1960 KHz duty cycle 50%, t/div 250ms, v/div 2V



Gambar 9. sinyal PWM 1960 KHz duty cycle 75%, t/div 250ms, v/div 2V



Gambar 10. sinyal PWM 1960 KHz duty cycle 100%, t/div 250ms, v/div 2V

Tabel 2. Data hasil pengujian driver heater dengan 5 variasi input PWM 1960 KHz

No.	Nilai PWM (desimal)	Duty Cycle (%)	Rata-rata Tegangan Keluaran Driver Heater (volt)
1	255	0	0
2	192	25	135
3	127	50	180
4	64	75	214
5	0	100	247

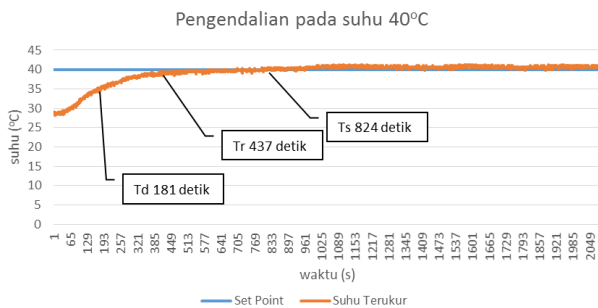
Berdasarkan hasil pengujian *driver heater* yang ditunjukkan pada Gambar 6,7,8,9,10 dan tabel 2 dapat dilihat bahwa tegangan masukan beban *heater* sudah sesuai dengan perancangan *driver heater* yaitu hasil keluaran tegangan *driver heater* bersifat *inverting*. Sifat *inverting*

berarti semakin kecil *input* PWM, gelombang *high* atau *on* yang dihasilkan semakin tinggi maka tegangan yang dihasilkan *driver heater* semakin besar. Hal ini menunjukkan *driver heater* sudah dapat mengendalikan tegangan dari beban *heater*.

3.2. Pengujian Respon Sistem

3.2.1. Pengujian Respon Sistem dengan Referensi Tetap

Pengujian respon sistem dengan referensi tetap dilakukan dengan mengirimkan referensi suhu sebesar 40°C melalui masukan *keypad*. Pengujian ini dilakukan pada kondisi suhu awal elemen pemanas 28°C. Respon yang dihasilkan sistem dengan referensi tetap ditunjukkan pada Gambar 11.

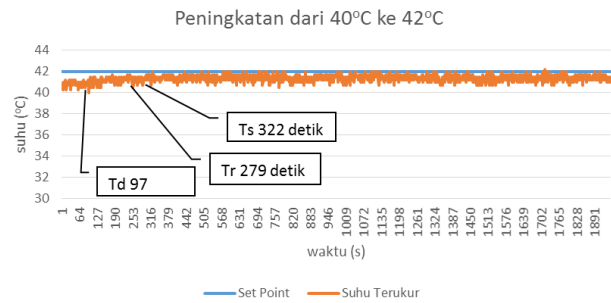


Gambar 11. Hasil Pengujian Respon Sistem dengan Referensi Tetap.

Berdasarkan hasil respon sistem pada referensi tetap pada Gambar 11, dapat dilihat bahwa kontrol PID mampu mencapai dan mempertahankan output suhu sesuai dengan nilai referensi menjadi 40,3°C. Grafik tanggapan respon sistem menunjukkan sistem termasuk jenis sistem orde satu. Karakteristik respon transien pada hasil pengujian menunjukkan waktu Td 181 detik, waktu Tr 437 detik dan waktu Ts 824 detik. Rata-rata *error* pengendalian suhu setelah sistem mencapai suhu stabil adalah ±0,60°C. Dari hasil pengujian tersebut dapat disimpulkan bahwa kontrol PID mampu bekerja dengan baik dalam mencapai dan mempertahankan suhu hingga 40,3°C.

3.2.2. Pengujian Respon Sistem dengan Referensi Naik

Pengujian respon sistem dengan referensi naik dilakukan dengan mengubah referensi suhu dari 40°C naik menjadi 42°C. dengan kondisi suhu awal elemen pemanas adalah 40°C. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kemampuan kontrol PID dalam menanggapi kenaikan referensi suhu. Hasil pengujian respon sistem dengan referensi naik ditunjukkan pada Gambar 12.

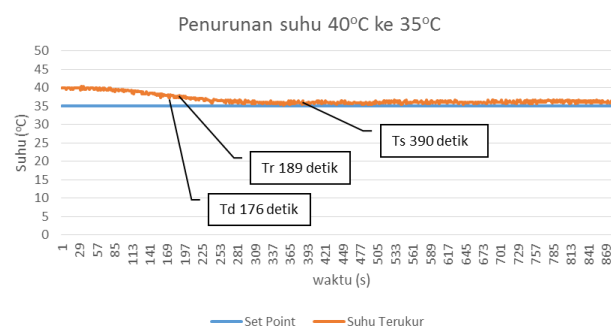


Gambar 12. Hasil Pengujian Respon Sistem dengan Referensi Naik.

Berdasarkan hasil respon sistem pada referensi naik pada Gambar 12, dapat dilihat bahwa kontrol PID mampu mencapai dan mempertahankan output suhu sesuai dengan kenaikan referensi suhu menjadi 41,7°C. Grafik tanggapan respon sistem menunjukkan sistem termasuk jenis sistem orde satu. Karakteristik respon transien pada hasil pengujian menunjukkan waktu Td 97 detik, waktu Tr 279 detik dan waktu Ts 322 detik. Dari hasil pengujian tersebut dapat disimpulkan bahwa kontrol PID mampu bekerja dengan baik dalam mencapai dan mempertahankan suhu hingga 41,7°C.

3.2.3. Pengujian Respon Sistem dengan Referensi Turun

Pengujian respon sistem dengan referensi turun dilakukan dengan mengubah referensi suhu dari 40°C turun menjadi 35°C. dengan kondisi suhu awal pada elemen pemanas adalah 40,3°C. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kemampuan kontrol PID dalam menanggapi penurunan referensi suhu. Hasil pengujian respon sistem dengan referensi turun ditunjukkan pada Gambar 13.



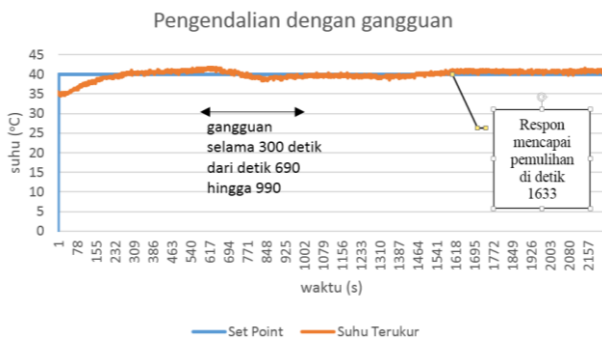
Gambar 13. Hasil Pengujian Respon Sistem dengan Referensi Turun.

Berdasarkan hasil respon sistem pada referensi naik pada Gambar 13 dapat dilihat bahwa kontrol PID mampu mencapai dan mempertahankan output suhu sesuai dengan penurunan referensi menjadi 35,9°C. Grafik tanggapan respon sistem menunjukkan sistem termasuk jenis sistem orde satu. Karakteristik respon transien pada hasil pengujian menunjukkan waktu Td 176 detik, waktu Tr 189

detik dan waktu T_s 390 detik. Dari hasil pengujian tersebut dapat disimpulkan bahwa kontrol PID mampu bekerja dengan baik dalam mencapai dan mempertahankan suhu hingga $35,9^\circ\text{C}$.

3.2.4. Pengujian Respon Sistem dengan Gangguan

Pengujian respon sistem dengan gangguan dilakukan dengan menghentikan laju angin dari kipas motor DC selama 10 menit ketika sistem telah mencapai keadaan stabil. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kemampuan kontrol PID dalam merespon gangguan tersebut. Pengujian ini dilakukan pada simulator alat pengering gabah dengan kondisi suhu awal 28°C lalu dinaikkan hingga stabil pada suhu $40,3^\circ\text{C}$. Hasil pengujian respon sistem dengan gangguan ditunjukkan pada Gambar 14.



Gambar 14. Hasil Pengujian Respon Sistem dengan Gangguan.

Berdasarkan hasil respon sistem dengan gangguan pada Gambar 14 dapat dilihat bahwa gangguan diberikan pada detik 690 selama kurang lebih 5 menit (300 detik). Efek gangguan respon sistem menyebabkan sistem menjadi tidak stabil dan suhu menurun cukup jauh dari referensi suhu terendah yang tercapai adalah $38,3^\circ\text{C}$. Sistem menaikkan tegangan selama gangguan berlangsung, hal tersebut terlihat pada kenaikan suhu di detik 930. Akan tetapi sistem tetap tidak dapat mencapai referensi suhu 40°C dan masih tidak stabil. Gangguan dihentikan setelah 3 detik dan suhu mulai berangsur naik untuk mencapai referensi yang diberikan. Dari hasil pengujian respon sistem dengan gangguan dapat disimpulkan bahwa kontrol PID mampu bekerja dengan baik dalam menanggapi gangguan yang diberikan. Kontrol PID mengembalikan respon sistem ke referensi 40°C ketika laju angin kipas motor DC dihentikan dengan waktu pemulihan menuju keadaan steadynya adalah 643 detik.

4. Kesimpulan

Berdasarkan pengujian dan analisis yang dilakukan pada sistem pengendalian suhu pada simulator mesin pengering fluidisasi gabah, penggunaan kontrol PID dengan parameter kontrol $K_p = 14,9$, $T_i = 188$ dan $T_d = 47$ hasil

penalaan metoda Ziegler Nichols 1 memiliki unjuk kerja yang baik karena mampu mencapai dan mempertahankan suhu plant pada referensi yang diinginkan meskipun terdapat perubahan referensi suhu serta dapat mengatasi gangguan yang terjadi. Pada pengujian respon sistem dengan referensi tetap 40°C menggunakan parameter kontrol PID hasil penalaan metoda Ziegler Nichols 1, dihasilkan T_d sebesar 181 detik, T_r sebesar 437 detik, dan T_s sebesar 824 detik. Rata-rata *error* pengendalian suhu setelah sistem mencapai suhu stabil adalah $\pm 0,60^\circ\text{C}$. Pada pengujian respon sistem dengan referensi naik dari 40°C ke 42°C menggunakan parameter kontrol PID hasil penalaan metoda Ziegler Nichols 1, dihasilkan T_d sebesar 97 detik, T_r sebesar 279 detik, dan T_s sebesar 322 detik. Pada pengujian respon sistem dengan referensi turun dari 40°C ke 35°C menggunakan parameter kontrol PID hasil penalaan metoda Ziegler Nichols 1, dihasilkan T_d sebesar 176 detik, T_r sebesar 189 detik, dan T_s sebesar 390 detik. Pada pengujian respon sistem dengan gangguan menggunakan parameter kontrol PID hasil penalaan metoda Ziegler Nichols 1 memberikan hasil bahwa kontrol PID mampu mengatasi gangguan dan dapat mengembalikan respon sistem ke referensi 40°C yang diberikan dengan waktu pemulihan menuju keadaan steadynya adalah 643 detik. Pengembangan pengujian menggunakan *plant* mesin pengering gabah fluidisasi dengan spesifikasi elemen pemanas 3200 Watt 15A sangat disarankan.

Referensi

- [1] H. K. Purwadaria, "Problems and Priorities of Grain Drying in Indonesia," in *Grain Drying in Asia*, 1995, pp. 31–37.
- [2] Badan Standardisasi Nasional, "SNI 6128:2015," 2015.
- [3] W. Wongrat, Abdunnaser Younes, A. Lohi, A. Elkamel, and P. L. Douglas, "Control vector optimization and genetic algorithms for mixed-integer dynamic optimization in the synthesis of rice drying processes," *J. Franklin Inst.*, vol. 348, no. 7, pp. 1318–1338, 2011.
- [4] J. Bon and T. Kudra, "Enthalpy-driven optimization of intermittent drying," *Dry. Technol.*, vol. 25, no. 4, pp. 523–532, 2007.
- [5] C. G. J. Baker and K. A. McKenzie, "Energy Consumption of Industrial Spray Dryers," *Dry. Technol.*, vol. 23, no. 1–2, pp. 365–386, 2005.
- [6] A. Olmos, I. C. Trelea, F. Courtois, C. Bonazzi, and G. Trystram, "Dynamic optimal control of batch rice drying process," *Dry. Technol.*, vol. 20, no. 7, pp. 1319–1345, 2002.
- [7] A. E. Gürel and İ. Ceylan, "Thermodynamic analysis of PID temperature controlled heat pump system," *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 2, pp. 42–49, 2014.
- [8] M. Djaeni, Inovasi dan Hilirisasi Sistem Pengering Melalui Dehumidifikasi Udara Dengan Zeolite Untuk Meningkatkan Kualitas Bahan Pangan, no. July. Semarang: UNDIP Press, 2016.
- [9] M. Djaeni, D. Ayuningtyas, and N. Asiah, "PADDY DRYING IN MIXED ADSORPTION DRYER WITH ZEOLITE : DRYING RATE AND TIME ESTIMATION," *Reaktor*, vol. 14, no. 3, 2013.

- [10] J. P. Holman, Heat Transfer. New York: McGraw Hill, 1986.
- [11] H. Andrianto, Pemrograman Mikrokontroler AVR ATmega16 Menggunakan Bahasa C (CodeVisionAVR). Informatika Bandung, 2015.
- [12] K. I. Sram, "with 16K Bytes Programmable ATmega16 (L)."
- [13] ASTM Committee E20 on Temperature Measurement, Manual On The Use Of Thermocouples In Temperature Measurement, 4th ed. 1993.
- [14] M. H. Abdullah, S. A. C. Ghani, Z. Zaulkafilai, and S. N. Tajuddin, "Development open source microcontroller based temperature data logger," IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., vol. 257, p. 12015, 2017.
- [15] Y. Li and L. Zhang, "Design of Digital K-Type Thermocouple Temperature Transmitter," Appl. Mech. Mater., vol. 433–435, pp. 217–220, 2013.
- [16] C. D. Simpson, Industrial Electronics. Prentice-Hall, Inc, 1996.
- [17] M. H. Rashid, Power Electronics. Prentice Hall Inc., 1993.
- [18] International Rectifier, "Irf3205." 2001.
- [20] I. Setiawan, Kontrol PID Untuk Proses Industri. Elex Media Komputindo, 2008.
- [21] O. Katsuhiko, Modern Control Engineering. Prentice Hall Inc., 1996.
- [22] A. Triwiyatno and A. Warsito, Sistem Kontrol Analog. UPT UNDIP Press, 2013.