

Penerapan Pengendali Suhu pada Proses Pasteurisasi Susu dengan Menggunakan Metode PID Ziegler-Nichols

Hendra Putra Setyawan¹, Akhmad Fahrudi¹

Teknik Elektro, Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya¹

e-mail: hendraps28@gmail.com

ABSTRACT

The milk pasteurization process is an effective method to eliminate pathogenic bacteria and extend the shelf life of milk. Based on the SNI 19-1502-1989 standard, pasteurized milk occurs at a temperature between 63 and 66 °C for at least 30 minutes (low temperature long time) or at 72 °C for at least 15 seconds (high temperature short time). Previous research has only studied one process, either HTST or LTLT, and compared the fuzzy, PI, and PID methods. This research shows the superiority of the PID method, which has been refined by previous studies and adopted as a method for the milk pasteurization process. It applied the PID method to two processes, HTST and LTLT, for milk pasteurization. The test results indicated that this system required only about ± 1 hour and 7 minutes for both PID processes, compared to traditional methods. In addition, this system showed a performance comparison between the Ziegler-Nichols PID and Trial-Error methods in terms of rise time, delay time, overshoot, and steady-state error.

Kata kunci: Milk Pasteurization, Low Temperature Long Time, High Temperature Short Time, Ziegler-Nichols PID Method, Trial-Error.

ABSTRAK

Proses pasteurisasi susu adalah metode yang efektif untuk mengeliminasi bakteri patogen dan memperpanjang masa simpan susu. Menurut standar SNI 19-1502-1989, susu pasteurisasi dipanaskan pada suhu antara 63-66°C selama minimal 30 menit (Low Temperature Long Time) atau pada suhu 72°C selama minimal 15 detik (High Temperature Short Time). Penelitian sebelumnya hanya meneliti salah satu proses, baik HTST atau LTLT, serta melakukan perbandingan antara metode Fuzzy, PI, dan PID. Penelitian ini menunjukkan keunggulan metode PID yang telah disempurnakan oleh penelitian sebelumnya dan diadopsi sebagai metode untuk proses pasteurisasi susu. Dalam penelitian ini, metode PID diterapkan pada dua proses, yaitu HTST dan LTLT, untuk pasteurisasi susu. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem ini hanya memerlukan waktu sekitar ± 1 jam 7 menit untuk kedua proses PID secara keseluruhan, dibandingkan dengan metode tradisional. Selain itu, sistem ini menunjukkan perbandingan performa antara metode PID Ziegler-Nichols dengan Trial-Error dalam hal rise time, delay time, overshoot, error-steady state.

Kata kunci: Pasteurisasi Susu; Low Temperature Long Time; High Temperature Short Time; Metode PID Ziegler-Nichols; Trial-Error.

PENDAHULUAN

Proses pasteurisasi sebagai satu dari sekian teknik pemanasan yang diterapkan pada susu segar untuk memperpanjang umur simpannya. Kebermanfaatan lainnya dari proses pasteurisasi yakni untuk mengeliminasi bakteri patogen yang mampu membahayakan kesehatan [1]. Menurut ketentuan dalam standar SNI 19-1502-1989, susu pasteurisasi merujuk pada jenis susu segar, rekonstruksi, atau rekombinasi yang sudah dipanaskan pada suhu antara 63-66°C dengan rentang waktu minimal 30 menit, ataupun disuhu 72°C selama minimal 15 detik [2][3].

Selain mengeliminasi bakteri patogen yang berpotensi membahayakan kesehatan, pasteurisasi turut menambah masa simpan susu sehingga kualitasnya tetap stabil untuk periode tertentu. Kebermanfaatan secara ekonomis bagi peternak sapi perah sangat dirasakan melalui pengelolaan pasteurisasi. Pertama, nilai jual susu pasteurisasi lebih tinggi dibanding susu yang

dioalah tanpa pasteurisasi. Kedua, umur produk susu lebih panjang sehingga meminimalisir terbuangnya produk secara percuma apabila tidak dikonsumsi [4].

Dalam pengendalian suhu bahan baku makanan dan minuman, metode kontrol yang dipergunakan yakni metode PID (Proportional Integral Derivative). Metode PID merupakan strategi yang paling umum dipergunakan dalam pengendalian ranah kelola industri. Survei menunjukkan bahwa sebagian besar industri pada ranah proses, seperti industri makanan dan minuman, pulp, kimia, minyak, serta oli & gas memiliki persentase sebesar 97% dalam penggunaan PID sebagai komponen vital dalam sistem pengendaliannya [5].

Dalam penelitian sebelumnya, Penelitian oleh Syafrizal Syarif dkk menunjukkan bahwa kontrol Logika Fuzzy memiliki waktu respon yang lebih cepat daripada kontrol PI pada sistem pasteurisasi susu HTST [1]. Kelebihan dari kontrol PI memiliki nilai overshoot dan steady state error lebih kecil dibandingkan kelemahannya yang hanya memakai kontrol Fuzzy yang hasilnya malah sebaliknya serta hanya menggunakan sistem HTST saja. Jurnal yang kedua, oleh Yosefine dkk membandingkan model LTLT dengan metode kontrol PID dan Fuzzy, menemukan bahwa PID lebih cepat dalam respon dan efektif dalam mengurangi mikroba patogen sesuai SNI [4]. Kelebihan dari kontrol PID yang digunakan memiliki respon lebih cepat daripada kontrol Fuzzy dan hanya menggunakan sistem LTLT saja tanpa HTST. Selanjutnya, Tugas akhir oleh Gita Adi Putranto dkk merancang sistem pendingin susu pasteurisasi, menunjukkan bahwa metode water cooling system lebih cepat dibandingkan tanpa perlakuan tambahan. Penelitian ini mendukung penggunaan kontroler PID sebagai metode yang efisien untuk eliminasi bakteri dalam susu dibandingkan metode Fuzzy yang lebih kompleks [3].

Berdasarkan kelebihan dan kekurangan dari penelitian sebelumnya, perhitungan dan pengambilan data dilakukan pada kontroler yang hanya digunakan untuk keperluan pembelajaran dan belum dapat memenuhi kebutuhan industri. Dalam tugas akhir ini akan ditambahkan kontrol PID dengan konsep HTST (High Temperature Short Time) dan LTLT (Low Temperature Long Time) serta sensor yang lebih sesuai, dan akan dirancang kontrol pemanas pada tangki pasteurisasi menggunakan metode PID yang memiliki kinerja yang baik dalam kondisi yang stabil maupun pada suhu tinggi atau rendah. Penerapan metode ini juga bertujuan untuk menjaga suhu susu tetap stabil .

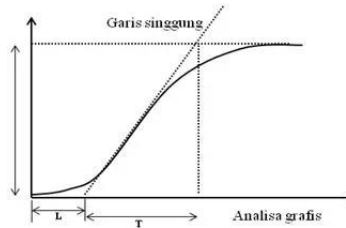
TINJAUAN PUSTAKA

Kontrol PID (*Porpotional Integral Derivative*)

Kontrol PID merupakan integrasi proporsional, integral, dan derivatif untuk meningkatkan presisi dalam sistem kontrol melalui penggunaan umpan balik. Keuntungannya meliputi respons sistem yang lebih cepat, eliminasi offset, dan efisiensi tambahan dalam menanggapi perubahan beban. Dalam teori kontrol, kontroler PID adalah gabungan paralel dari kontroler proporsional (P), integral (I), dan derivatif (D), yang bekerja bersama untuk mengoptimalkan respons sistem. Karakteristik kontrol PID sangat ditentukan oleh nilai proporsional (K_p), integral (K_i), dan derivatif (K_d), yang diatur untuk mempengaruhi respons keseluruhan sistem. Pengaturan parameter PID didasarkan pada sifat kontrol yang diinginkan, dengan eksperimen sering digunakan untuk membangun model matematis sistem yang kompleks dan menghasilkan data yang diperlukan untuk mengoptimalkan kontrol PID [6][7].

Metode Ziegler-Nichols

Perancangan kendali PID dengan menerapkan metode Ziegler-Nichols dengan awal melibatkan penerapan sistem loop terbuka, sebagaimana diilustrasikan dalam Gambar 1. Respons yang dihasilkan oleh sistem loop terbuka ini berwujud gelombang step, seperti yang disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Respon sistem loop terbuka

Proses penentuan parameter K_p , K_i , dan K_d pada teknik ini dimulai dengan mengevaluasi nilai L dan T sebagaimana diperlihatkan dalam Gambar 2.4. L yang bernilai (10%) merujuk pada nilai dead time (time delay/lag) dalam respons yang berkaitan dengan pergerakan dari titik nol menuju waktu cut-off, sementara T yang bernilai (63%) mencerminkan konstanta waktu. Kedua parameter tersebut diukur dalam satuan detik (sekon) [8].

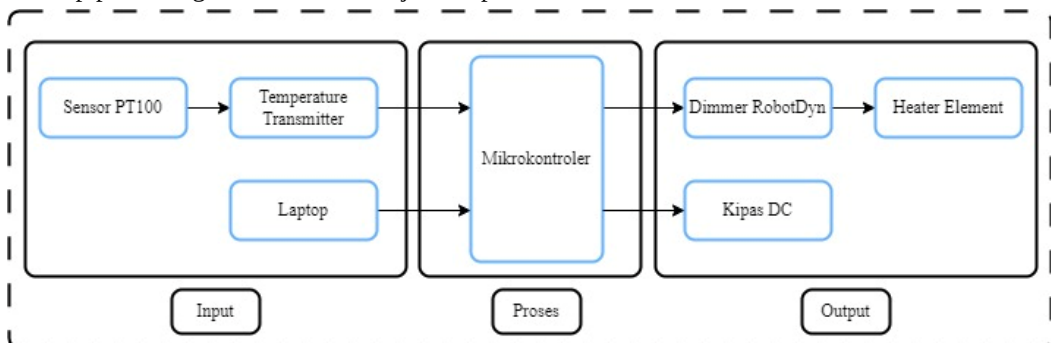
Garis diagonal ditarik pada respons loop terbuka dengan menempelkannya pada bagian gelombang yang terlipat. Penentuan nilai L dilakukan melalui perpotongan garis diagonal dengan sumbu x , sementara nilai T diambil dari perpotongan garis diagonal dengan garis perpanjangan steady state. Setelah mendapatkan nilai L dan T , langkah selanjutnya adalah mencari nilai K_p , K_i , dan K_d dengan merujuk pada hitungan yang terdokumentasi dalam Tabel 1.

Tabel 1. Perhitungan konstanta PID Metode Ziegler-Nichols

Tipe Pengendali	K_p	T_i	T_d	K_i	K_d
P	T / L	∞	0	K_p / T_i	$K_p \times T_d$
PI	$0,9T / L$	$L / 0,3$	0	K_p / T_i	$K_p \times T_d$
PID	$1,2T / L$	$2L$	$0,5L$	K_p / T_i	$K_p \times T_d$

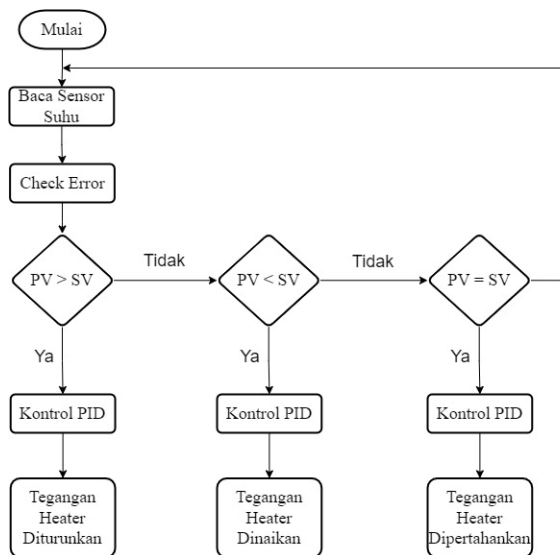
METODE

Perancangan merupakan gambaran langkah-langkah dalam pembuatan aplikasi. Dalam perancangan sistem Pengendali Suhu pada Proses Pasteurisasi Susu dengan menggunakan Metode PID, digunakan Sensor PT100 untuk mendeteksi suhu susu pada tangki pemanas. Sistem ini juga melibatkan sebuah mikrokontroler, catu daya berupa power 24VDC, serta perangkat pemanas air untuk memanaskan air dalam tangki. Selain itu, digunakan kipas dan motor DC untuk mencampur dan menjaga suhu susu agar tetap pada set point yang telah ditentukan. Konsep perancangan sistem ini ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Konsep perancangan sistem

Perancangan ini melibatkan berbagai komponen dan sensor yang mendukung pengendalian suhu dalam proses pasteurisasi susu menggunakan teknik PID, sebagaimana terlihat pada Gambar 2. Komponen yang terpasang meliputi Arduino Uno, Modul LM2596, Motor Pengaduk DC, Kipas DC, dua Dimmer RobotDyn, Sensor Temperature Transducer PT100, Modul Temperature Transmitter, dan Water Heater Element. Sensor PT100 harus terhubung dengan Temperature Transmitter untuk memantau suhu dari tabung pemanas, mengirim sinyal 0-5 VDC ke Arduino Uno sebagai umpan balik PID. Temperature Transmitter memerlukan tegangan 24VDC dari power supply yang juga mengatur tegangan untuk Modul LM2596 sebagai buck converter, mengubah 24VDC menjadi 12VDC untuk Motor Pengaduk DC, dua Dimmer RobotDyn, dan regulator 5V untuk Arduino Uno.



Gambar 3. Diagram alir sistem

Pada Gambar 3, yang menampilkan flowchart perancangan perangkat lunak, proses dimulai dengan inisialisasi program untuk menyesuaikan parameter PID: Kp, Ki, dan Kd. Langkah ini krusial untuk memastikan konfigurasi sistem sebelum masuk ke fase operasional, memungkinkan kontrol pemanas beroperasi dengan efisien dan konsisten. Setelah inisialisasi, sensor PT100 digunakan untuk membaca suhu susu yang membantu menentukan set point, terutama dalam proses LTLT (Low Temperature Long Time). Penggunaan sensor PT100 memastikan respons program terhadap suhu aktual dan penyesuaian set point sesuai variabilitas suhu susu, meningkatkan presisi dan kontrol sistem. Proses LTLT melibatkan pemanasan susu hingga 63°C selama 30 menit dengan kipas berfungsi sebagai pengendali suhu untuk menjaga stabilitas. Proses kedua dimulai dengan sensor PT100 membaca suhu susu tanpa inisialisasi PID, mempercepat respons sistem dalam proses HTST (High Temperature Short Time). Sensor ini juga menentukan set point untuk meningkatkan suhu susu hingga 72°C dalam 15 detik, dengan kipas berperan dalam menjaga stabilitas suhu selama proses HTST tanpa inisialisasi PID.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil implementasi rancangan hardware

Hasil implementasi perangkat keras menggunakan satu buah sensor PT100, mikrokontroler, dan perangkat pendukung lainnya dapat dilihat pada Gambar 4.

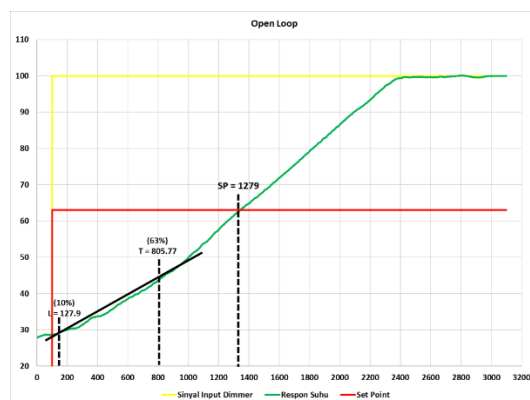


Gambar 4. Hasil implementasi rancangan hardware

Pada Gambar 4 merupakan hasil implementasi rancangan hardware yang dibuat sesuai dengan prinsip kerja dari pemanas atau Heater Element yang dikendalikan oleh Dimmer RobotDyn sebagai kontrol suhu dengan kontrol PID pada penelitian yang akan dibuat, dengan tujuan untuk mengatur kestabilan suhu.

Pengujian Open Loop Ziegler-Nichols

Pengujian komprehensif dilakukan untuk memahami karakteristik pemanas yang menggunakan AC Light Dimmer dalam sistem ini. Tujuannya adalah mengevaluasi suhu yang dihasilkan oleh pemanas selama periode pengujian 50 menit dengan menggunakan sekitar ± 10 liter air. Pemanas listrik diaktifkan sebagai input step selama periode tersebut untuk mengukur respons suhu. Data yang terukur dianalisis untuk menentukan metode kontrol yang paling sesuai. Berdasarkan grafik pada Gambar 5, terlihat bahwa sebelum dilakukan penyetelan (tuning), suhu awal melebihi set point dan mencapai 100°C . Grafik tersebut juga memungkinkan untuk menentukan dead time (L) dan delay time (T), yang umumnya bernilai sekitar 10% dan 63% dari nilai steady state-nya, sesuai dengan informasi yang tergambar dalam grafik respons.



Gambar 5. Karakteristik Pemanas dari 27.9°C sampai 100°C

Dalam hal ini steady state dianggap sebagai nilai set point. Untuk selanjutnya kedua nilai ini digunakan untuk penentuan koefisien PID. Kemudian dilakukan perhitungan nilai waktu menuju set point (detik) = 1279, perhitungan L (10%) dari 1279 = 127.9 dan perhitungan T (63%) dari 1279 = 805.77.

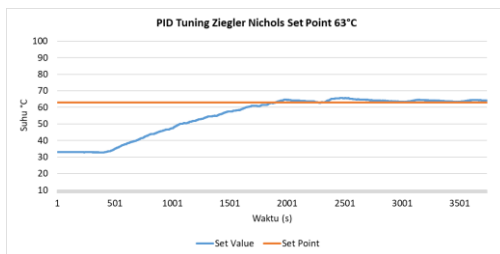
Tabel 2. Penalaan Parameter PID pada Media Pemanas berdasarkan Respon *Open Loop*

	P	PI	PID
Kp	$\frac{T}{L} = \frac{805.77}{127.9} = 6.3$	$0.9 \frac{T}{L} = 5.67$	$1.2 \frac{T}{L} = 7.56$
Ti	0	$\frac{L}{0.3} = \frac{127.9}{0.3} = 426.333$ $K_i = \frac{K_p}{T_i} = \frac{5.67}{426.333} = 0.014777$	$2 L = 255.8$ $K_i = \frac{K_p}{T_i} = \frac{7.56}{255.8} = 0.029554$
Td	0	0	$0.5 L = 63.95$ $K_d = K_p.T_d = 7.56 \times 63.95 = 483.462$

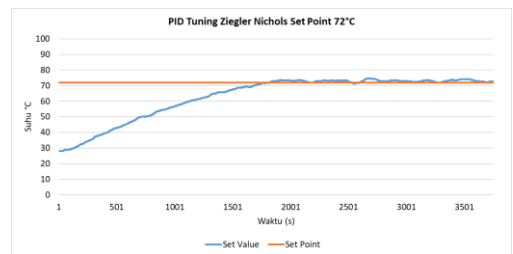
Dari eksperimen respons sistem dalam mode open loop, diperoleh konstanta PID: $K_p=6.3$, $K_i=0.014777$, dan $K_d=483.462$. Konstanta ini penting untuk merancang program pengaturan sistem, memungkinkan kontrol proporsional, integral, dan derivatif yang optimal. Dengan nilai-nilai ini, diharapkan program mampu mengendalikan sistem secara efektif sesuai dengan respons yang diamati selama eksperimen.

Pengujian Karakteristik PID

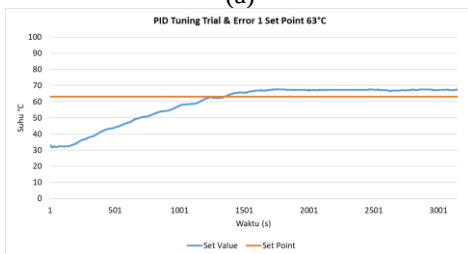
Pada pengujian karakteristik PID ada 5 kali pengujian diantaranya percobaan dengan set point 63°C dan 72°C serta untuk parameter PID yang berbeda-beda.



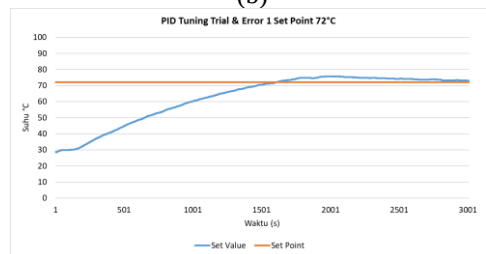
(a)



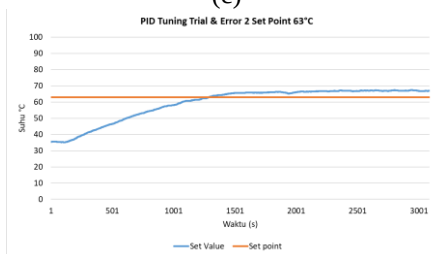
(b)



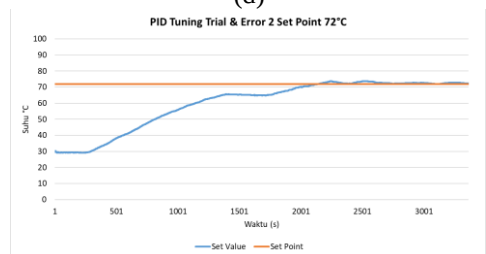
(c)



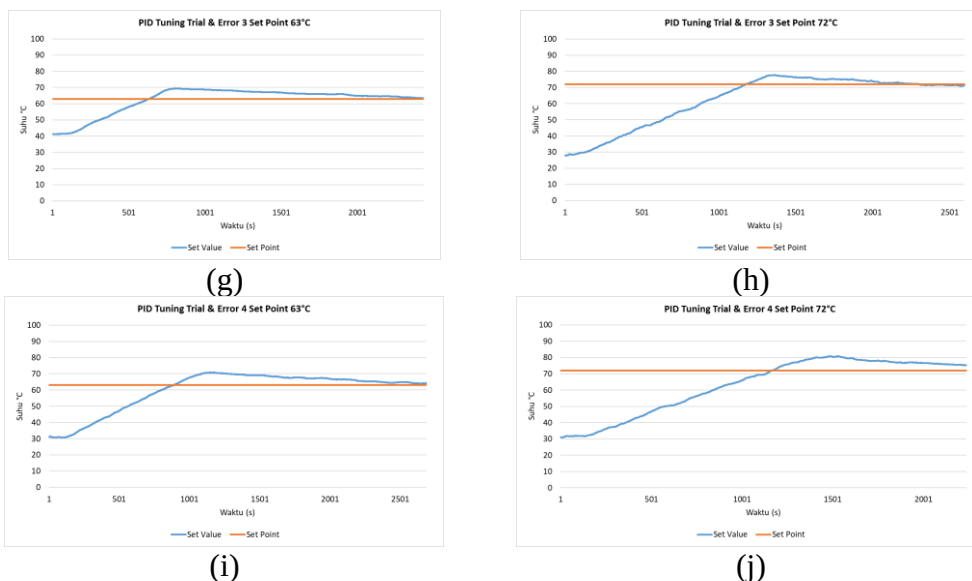
(d)



(e)



(f)



Gambar 6. a) Grafik Pengujian PID Set Point=63°C saat $K_p=7.56$, $K_i=0.029554$, $K_d=483.462$, b.) Grafik Pengujian PID Set Point=72°C saat $K_p=7.56$, $K_i=0.029554$, $K_d=483.462$, c.) Grafik Pengujian PID Set Point=63°C saat $K_p=5$, $K_i=1$, $K_d=400$, d.) Grafik Pengujian PID Set Point=72°C saat $K_p=5$, $K_i=1$, $K_d=400$, e.) Grafik Pengujian PID Set Point=63°C saat $K_p=12$, $K_i=2$, $K_d=600$, f.) Grafik Pengujian PID Set Point=72°C saat $K_p=12$, $K_i=2$, $K_d=600$, g.) Grafik Pengujian PID Set Point=63°C saat $K_p=1.5$, $K_i=4$, $K_d=1$, h.) Grafik Pengujian PID Set Point=72°C saat $K_p=1.5$, $K_i=4$, $K_d=1$, i.) Grafik Pengujian PID Set Point=63°C saat $K_p=2$, $K_i=1$, $K_d=3$, j.) Grafik Pengujian PID Set Point=72°C saat $K_p=2$, $K_i=1$, $K_d=3$

Sumber: dokumen pribadi peneliti

Dari gambar diatas penjelasan setiap pengujian yang dilakukan, pengujian pertama set point 63°C (Gambar 6a): $K_p=7.56$, $K_i=0.029554$, $K_d=483.462$; suhu awal 33°C. Rise time: 26.5 menit, peak time: 65.7°C, overshoot: 64°C, settling time: 50 menit, steady state: 62-65°C. Set point 72°C (Gambar 6b): $K_p=7.56$, $K_i=0.029554$, $K_d=483.462$; suhu awal 28°C. Rise time: 30.3 menit, peak time: 74.6°C, overshoot: 73.7°C, settling time: 36.5 menit, steady state: 72-74°C.

Pengujian kedua, set point 63°C (Gambar 6c): $K_p=5$, $K_i=1$, $K_d=400$; suhu awal 32.3°C. Rise time: 22.4 menit, peak time: 67.7°C, overshoot: 66.9°C, settling time: 25.5 menit, steady state: 63-67°C. Set point 72°C (Gambar 6d): $K_p=5$, $K_i=1$, $K_d=400$; suhu awal 28.5°C. Rise time: 26.4 menit, peak time: 75.8°C, overshoot: 74.6°C, settling time: 49.8 menit, steady state: 72-75.8°C.

Pengujian ketiga, set point 63°C (Gambar 6e): $K_p=12$, $K_i=2$, $K_d=600$; suhu awal 35.4°C. Rise time: 21.5 menit, peak time: 67.5°C, overshoot: 66°C, settling time: 33.3 menit, steady state: 63-67.5°C. Set point 72°C (Gambar 6f): $K_p=12$, $K_i=2$, $K_d=600$; suhu awal 30°C. Rise time: 8.6 menit, peak time: 73.8°C, overshoot: 73.6°C, settling time: 13 menit, steady state: 72-73.8°C.

Pengujian keempat, set point 63°C (Gambar 6g): $K_p=1.5$, $K_i=4$, $K_d=1$; suhu awal 41.2°C. Rise time: 10.6 menit, peak time: 69.4°C, overshoot: 69.3°C, settling time: 40.4 menit, steady state: 63-69.4°C. Set point 72°C (Gambar 6h): $K_p=1.5$, $K_i=4$, $K_d=1$; suhu awal 28°C. Rise time: 19.5 menit, peak time: 77.7°C, overshoot: 77°C, settling time: 35.3 menit, steady state: 72-77.7°C.

Pengujian kelima, set point 63°C (Gambar 6i): $K_p=2$, $K_i=1$, $K_d=3$; suhu awal 31°C. Rise time: 14.8 menit, peak time: 70.8°C, overshoot: 70°C, settling time: 29.3 menit, steady state: 63-70.8°C. Set point 72°C (Gambar 6j): $K_p=2$, $K_i=1$, $K_d=3$; suhu awal 31°C. Rise time: 19.4 menit, peak time: 80.8°C, overshoot: 80°C, settling time: 34.9 menit, steady state: 72-80.8°C.

Untuk mengetahui nilai error overshoot dan nilai error-stedy state dapat dilihat pada tabel 3 dibawah ini.

Tabel 3. *Error Overshoot dan Error-steady state Set Point 63°C*

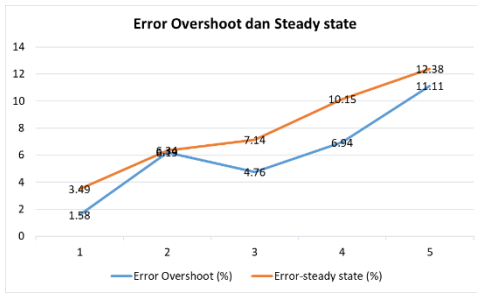
No	K_p , K_i , K_d	Set Point (°C)	Rise Time (detik)	Settling time (detik)	Error Overshoot (%)	Error-steady state (%)
1	7.56; 0.029554; 483.462	63	1590	3000	1.58	3.49
2	5; 1; 400	63	1343	1530	6.19	6.34
3	12; 2; 600	63	1288	1995	4.76	7.14
4	1.5; 4; 1	63	635	2425	6.94	10.15
5	2; 1; 3	63	886	1755	11.11	12.38

Pada Tabel 3, hasil pengujian lima kali menggunakan set point 63°C menunjukkan variasi nilai error overshoot dan error steady state. Pada pengujian pertama, dari set point 55°C, error overshoot mencapai 1.58% dan error steady state dari set point 63°C sebesar 3.49%. Pada pengujian kedua dengan set point 63°C, error overshoot pertama mencapai 6.19% dan error steady state 6.34%. Pengujian ketiga menunjukkan error overshoot 4.76% dan error steady state 7.14% dari set point 63°C. Pengujian keempat mencatat error overshoot sebesar 22.22% dan error steady state 10.15%. Sementara itu, pengujian kelima mencatat error overshoot 11.11% dan error steady state 12.38% dari set point 63°C.

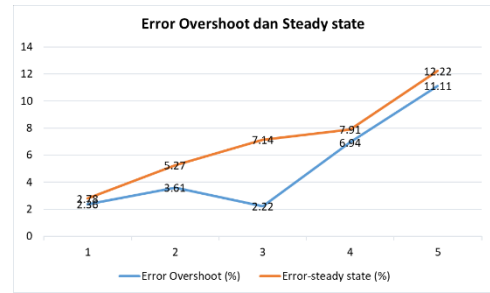
Tabel 4. *Error Overshoot dan Error-steady state Set Point 72°C*

No	K_p , K_i , K_d	Set Point (°C)	Rise Time (detik)	Settling time (detik)	Error Overshoot (%)	Error-steady state (%)
1	7.56; 0.029554; 483.462	72	1818	2190	2.36	2.78
2	5; 1; 400	72	1584	2987	3.61	5.27
3	12; 2; 600	72	516	785	2.22	7.14
4	1.5; 4; 1	72	1172	2120	6.94	7.91
5	2; 1; 3	72	1161	2094	11.11	12.22

Pada Tabel 4, hasil pengujian lima kali menggunakan set point 72°C menunjukkan variasi nilai error overshoot dan error steady state. Pada pengujian pertama dengan set point 72°C, error overshoot mencapai 2.36% dan error steady state 2.78%. Pada pengujian kedua, error overshoot mencapai 3.61% dan error steady state 5.27% dari set point 72°C. Pengujian ketiga mencatat error overshoot 2.22% dan error steady state 7.14%. Pengujian keempat mencatat error overshoot 6.94% dan error steady state 7.91%. Sementara itu, pengujian kelima mencatat error overshoot 11.11% dan error steady state 12.22% dari set point 72°C.



(a)



(b)

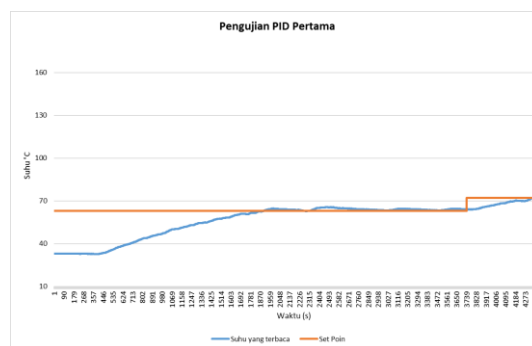
Gambar 7. a) Grafik *Error Overshoot* dan *Steady state* Set Point 63°C, b) Grafik *Error Overshoot* dan *Steady state* Set Point 72°C

Sumber: dokumen pribadi peneliti

Pada Gambar 7 a.) grafik menunjukkan error overshoot dan error steady state. Nilai error overshoot meningkat pada percobaan pertama, menurun pada percobaan ketiga, dan naik pada percobaan keempat serta kelima. Untuk error steady state, nilai meningkat pada percobaan pertama dan kedua, menurun pada percobaan ketiga, dan naik kembali pada percobaan keempat serta kelima. Sedangkan pada Gambar 7 b.) grafik menunjukkan error overshoot dan error steady state. Nilai error overshoot meningkat pada percobaan kedua, menurun pada percobaan ketiga, dan naik pada percobaan keempat serta kelima. Untuk error steady state, nilai meningkat pada percobaan kedua dan ketiga, menurun pada percobaan keempat, dan naik kembali pada percobaan kelima.

Pengujian PID Pertama

Pada tahap awal, pengujian dilaksanakan untuk mengevaluasi kinerja sistem pasteurisasi susu menggunakan metode PID yang sudah tersetting untuk setiap parameter Kp, Ki, dan Kd. Tujuan dari pengujian ini untuk memahami respon dari parameter PID yang telah dikonfigurasi, dengan set poin pada temperatur 63°C selama 30 menit untuk proses pertama dan set poin temperatur 72°C selama 15 detik untuk proses kedua. Percobaan pertama digunakan Variabel Parameter Kp = 7.56, Ki = 0.029554, Kd = 483.462 Proses ini berlangsung selama 4040 detik atau ± 1 Jam 7 menit, dan hasil pengujian terdokumentasi dalam Tabel 2 dan Gambar 8 yang dapat dilihat berikut ini :



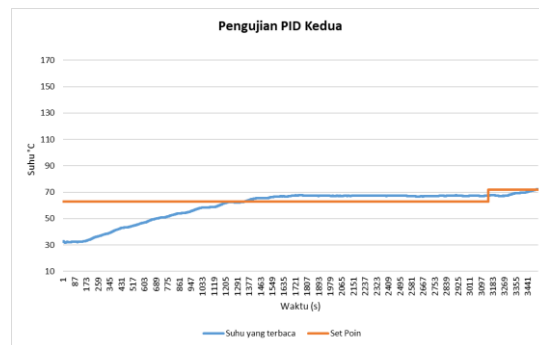
Gambar 8. Pengujian PID pertama

Berdasarkan Gambar 8, dapat diperhatikan perolehan eksperimen di mana suhu mengalami peningkatan saat pemanas pertama kali dinyalakan dan sensor PT100 mendeteksi suhu susu dalam tangki pemanas air. Proses pasteurisasi pertama berhasil mencapai set poin

pertama dengan suhu mencapai 63°C yang dicapai dalam waktu sekitar ± 26 menit atau 1590 detik serta set poin kedua dengan suhu mencapai 72°C yang dicapai dalam waktu 4026 detik atau ± 1 jam 7 menit.

Pengujian PID Kedua

Pada tahap kedua, pengujian dilaksanakan untuk mengevaluasi kinerja sistem pasteurisasi susu menggunakan metode PID yang sudah tersetting untuk setiap parameter Kp, Ki, dan Kd. Tujuan dari pengujian yakni untuk memahami respon dari parameter PID yang telah dikonfigurasi, dengan set poin pada temperatur 63°C selama 30 menit untuk proses pertama dan set poin temperatur 72°C selama 15 detik untuk proses kedua. Percobaan kedua digunakan Variabel Parameter Kp = 5, Ki = 1, Kd = 400 Proses ini berlangsung selama 3513 detik atau ± 58 menit, dan hasil pengujian terdokumentasi dalam gambar 9 yang dapat dilihat berikut ini :

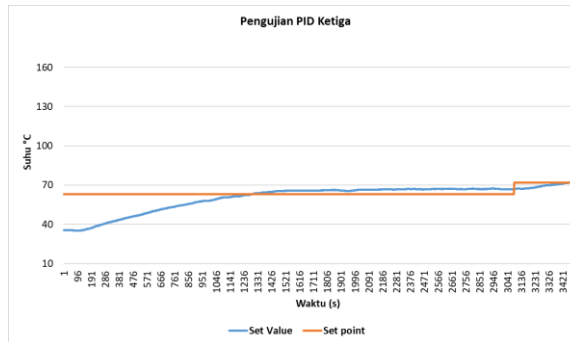


Gambar 9. Pengujian PID kedua

Tampilan Gambar 9, dapat diperhatikan hasil eksperimen di mana suhu mengalami peningkatan saat pemanas pertama kali dinyalakan dan sensor PT100 mendeteksi suhu susu dalam tangki pemanas air. Proses pasteurisasi pertama berhasil mencapai set poin pertama dengan suhu mencapai 63°C yang dicapai dalam waktu sekitar ± 22 menit atau 1342 detik tetapi setelah mencapai set poin suhu tidak bisa turun di 63°C itu menjadikan parameter Kp, Ki, dan Kd ini belum bisa dipakai sebagai acuan. serta set poin kedua dengan suhu mencapai 72°C yang dicapai dalam waktu 3499 detik atau ± 58 menit.

Pengujian PID Ketiga

Pada tahap ketiga, pengujian dilaksanakan untuk mengevaluasi kinerja sistem pasteurisasi susu menggunakan metode PID yang sudah tersetting untuk setiap parameter Kp, Ki, dan Kd. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk memahami respon dari parameter PID yang telah dikonfigurasi, dengan set poin pada temperatur 63°C selama 30 menit untuk proses pertama dan set poin temperatur 72°C selama 15 detik untuk proses kedua. Percobaan kedua digunakan Variabel Parameter Kp = 12, Ki = 2, Kd = 600 Proses ini berlangsung selama 3487 detik atau ± 58 menit, dan hasil pengujian terdokumentasi dalam Gambar 10 yang dapat dilihat berikut ini :

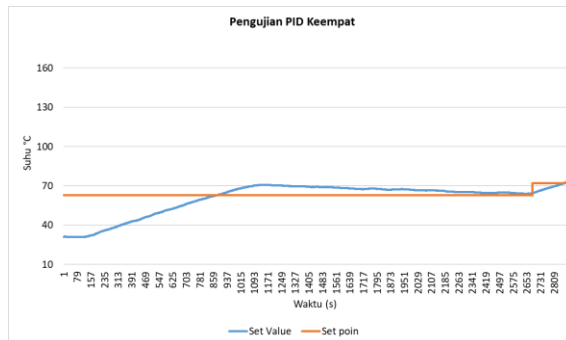


Gambar 10. Pengujian PID ketiga

Berdasarkan Gambar 10, eksperimen menunjukkan bahwa saat pemanas pertama kali aktif, suhu mengalami kenaikan yang cepat, di mana sensor PT100 mendeteksi suhu susu dalam tangki pemanas air. Proses pasteurisasi pertama mencapai set point 63°C dalam sekitar ± 21 menit atau 1286 detik. Namun, setelah mencapai set point, suhu tidak stabil pada 63°C, menunjukkan bahwa parameter Kp, Ki, dan Kd belum optimal untuk digunakan sebagai referensi. Proses pasteurisasi kedua mencapai set point 72°C dalam waktu 3467 detik atau ± 57 menit..

Pengujian PID Keempat

Pada tahap keempat pengujian, sistem pasteurisasi susu dievaluasi menggunakan metode PID yang telah dikonfigurasi dengan parameter Kp, Ki, dan Kd yang ditetapkan. Pengujian bertujuan untuk memahami respons dari pengaturan PID tersebut dengan set point 63°C selama 30 menit pada proses pertama, dan set point 72°C selama 15 detik pada proses kedua. Percobaan kedua menggunakan variabel parameter Kp = 1.5, Ki = 4, dan Kd = 1, dengan total durasi pengujian 2675 detik atau sekitar ± 44 menit. Hasil pengujian terdokumentasi dalam Gambar 11.

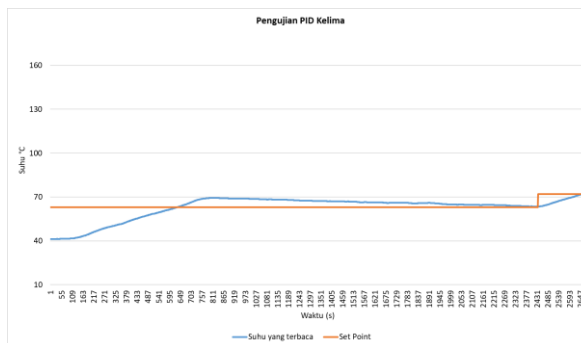


Gambar 11. Pengujian PID keempat

Berdasarkan Gambar 11, dapat diperhatikan hasil eksperimen di mana suhu mengalami peningkatan saat pemanas pertama kali dinyalakan dan sensor PT100 mendeteksi suhu susu dalam tangki pemanas air. Proses pasteurisasi pertama berhasil mencapai set poin pertama dengan suhu mencapai 63°C yang dicapai dalam waktu sekitar ± 10 menit atau 634 detik tetapi setelah mencapai set poin suhu tidak bisa turun di 63°C itu menjadikan parameter Kp, Ki, dan Kd ini belum bisa dipakai sebagai acuan. serta set poin kedua dengan suhu mencapai 72°C yang dicapai dalam waktu 2654 detik atau ± 44 menit.

Pengujian PID Kelima

Pada tahap kelima, pengujian dilaksanakan untuk mengevaluasi kinerja sistem pasteurisasi susu menggunakan metode PID yang sudah tersetting untuk setiap parameter K_p , K_i , dan K_d . Tujuan dari pengujian ini adalah untuk memahami respon dari parameter PID yang telah dikonfigurasi, dengan set poin pada temperatur 63°C selama 30 menit untuk proses pertama dan set poin temperatur 72°C selama 15 detik untuk proses kedua. Percobaan kedua digunakan Variabel Parameter $K_p = 2$, $K_i = 1$, $K_d = 3$ Proses ini berlangsung selama 2880 detik atau ± 48 menit, dan hasil pengujian terdokumentasi dalam Gambar 12 yang dapat dilihat berikut ini :



Gambar 12. Pengujian PID keempat

Berdasarkan Gambar 12, dapat diperhatikan hasil eksperimen di mana suhu mengalami peningkatan saat pemanas pertama kali dinyalakan dan sensor PT100 mendeteksi suhu susu dalam tangki pemanas air. Proses pasteurisasi pertama berhasil mencapai set poin pertama dengan suhu mencapai 63°C yang dicapai dalam waktu sekitar ± 14 menit atau 885 detik tetapi setelah mencapai set poin suhu tidak bisa turun di 63°C itu menjadikan parameter K_p , K_i , dan K_d ini belum bisa dipakai sebagai acuan. serta set poin kedua dengan suhu mencapai 72°C yang dicapai dalam waktu 2865 detik atau ± 44 menit.

KESIMPULAN

Berdasarkan pengujian dan analisis data sebelumnya, sistem Kontrol Suhu untuk Proses Pasteurisasi Susu dengan Metode PID menggunakan Arduino Uno dan sensor PT100 dilaporkan dapat beroperasi secara otomatis melalui Arduino IDE dalam waktu ± 1 jam 7 menit untuk dua proses PID secara keseluruhan, jauh lebih efisien dibandingkan metode tradisional. Sensor PT100 menunjukkan linieritas yang baik dan hasil yang konsisten, cocok untuk sistem ini. Pengujian respons dalam mode open loop menghasilkan konstanta PID optimal $K_p=7.56$, $K_i=0.029554$, dan $K_d=483.462$, yang diharapkan meningkatkan presisi dan responsivitas kontrol suhu, serta mengurangi tantangan seperti overshoot dan error steady state. Namun, perbandingan waktu mencapai suhu 63°C menunjukkan variasi signifikan: metode open loop 1861 detik, metode PID Ziegler-Nichols 3000 detik, dan pendekatan trial and error 1530 detik dengan tantangan menjaga stabilitas suhu yang perlu diperhatikan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Syarief, A. Velda, and C. Azizsam, "Rancang Bangun Miniatur Sistem Pengontrol Suhu Pada Proses Pasteurisasi Susu Prosiding Seminar Nasional Teknik Elektro Volume 8 Tahun 2023," vol. 8, 2023.
- [2] [BSN] Badan Standardisasi Nasional, "Susu pasteurisasi," pp. 1–12, 1995.
- [3] Gita Adi, Harianto, and Yosefine Triwidyastuti, "Rancang Bangun Pendingin Susu Hasil Pasteurisasi Menggunakan Metode Water Cooling System," *J. Technol. Informatics*, vol.

- 1, no. 1, pp. 41–48, 2019, doi: 10.37802/joti.v1i1.10.
- [4] Y. Triwidyastuti, M. Nizar, H. Harianto, and J. Jusak, “Pengendali Suhu pada Proses Pasteurisasi Susu dengan Menggunakan Metode PID dan Metode Fuzzy Sugeno,” *J. Teknol. Inf. dan Ilmu Komput.*, vol. 6, no. 4, p. 355, 2019, doi: 10.25126/jtiik.2019641068.
- [5] N. Z.A, Y. P. Roja, and N. Sylvia, “Aplikasi Kontrol PID pada Reaktor Pabrik Asam Formiat dengan Kapasitas 100.000 Ton/Tahun,” *J. Teknol. Kim. Unimal*, vol. 7, no. 2, p. 135, 2019, doi: 10.29103/jtku.v7i2.1253.
- [6] I. Saputro and A. Fahrudi, “Rancang Bangun Oven Drying Sebagai Alat Pengering Eceng Gondok pada Suhu Rendah Menggunakan Metode PID,” *Semin. Nas. Sains dan Teknol. Terap. IX*, pp. 189–196, 2021.
- [7] Y. C. P. Napitupulu, *SISTEM KENDALI TEKANAN PADA POMPA AIR SENTRIFUGAL COOLING TOWER MENGGUNAKAN METODE PID KONTROLER*. 2022.
- [8] A. Wijayanto, “POSTWELD HEAT TREATMENT TEMPERATURE CONTROL Oleh :,” 2016.