

Implementasi Pengendalian Suhu Pada Sistem Pasteurisasi Susu Dengan Metode PID Berbasis Temperature Controller

Lisa Indriyani^{1*}, Reza Maulidin², Puspa Jiwa Parahita Yunta³

^{1,2,3} Program Studi Teknik Elektro, Universitas PGRI Semarang
Jl. Sidodadi Timur 24- Dr. Cipto Semarang 50232 Indonesia

*Email: lisaindriyani1309@gmail.com

ABSTRAK

Pasteurisasi berfungsi untuk membunuh bakteri patogen yang dapat mengganggu kesehatan. Selain itu juga bermanfaat untuk menjaga kualitas susu sehingga dapat bertahan lama. Proses pasteurisasi yang digunakan yaitu dengan model *Low Temperature Long Time* (LTLT) dan digunakan suhu pemanasan 64⁰C selama 30 menit. Penelitian ini menggunakan sensor suhu PT100 sebagai sensor utama untuk pengambilan pengendalian suhu pada proses pasteurisasi ini. *Temperature controller* digunakan sebagai alat pengontrol dengan metode PID (*Proportional Integral Derivative*). Proses penentuan nilai PID digunakan dengan metode pendekatan Ziegler-Nichols tipe II dan *auto tuning*. Dari beberapa uji dengan metode kontrol PID respon yang diberikan dengan metode pendekatan Ziegler-Nichols tipe II lebih baik berdasarkan pengukuran *overshoot*. Diperoleh nilai PB = 15; TI = 150; dan TD = 38. Proses pasteurisasi ini menghasilkan susu dengan daya tahan yang baik, yaitu bisa bertahan 1 hari.

Kata kunci: *Pasteurisasi susu, Pengendalian suhu, Kontrol PID (Proportional Integral Derivative), Temperature controller.*

PENDAHULUAN

Susu merupakan bahan minuman yang memiliki banyak kandungan gizi tinggi tetapi rentan terhadap bakteri sehingga tidak tahan lama. Oleh karena itu, perlu pengolahan susu agar bisa mengoptimalkan kualitas susu dan ketahanan susu sehingga susu bisa bertahan cukup lama. Salah satu pengolahan untuk mencegah kerentanan susu terhadap kerusakan yaitu melakukan pasteurisasi susu dengan cara pemanasan.

Pasteurisasi adalah proses pemanasan dengan tujuan untuk menghancurkan mikroorganisme penyebab penyakit (patogen) yang ada di dalam susu mentah, dengan cara memanaskan susu ditemperatur tinggi agar tetap terjaga kualitas nutrisi susu. Menurut [1] empat cara dasar pasteurisasi susu, (1) Pasteurisasi suhu rendah berkelanjutan (*LTLT = Low Temperature Long Time*), pasteurisasi dengan memanaskan hingga 62,2⁰-65⁰C selama 30 menit. (2) Pasteurisasi suhu tinggi berkelanjutan (*HTLT = High Temperature Long Time*), pasteurisasi dengan memanaskan hingga lebih dari 72⁰C selama lebih dari 15 menit. (3) Metode suhu tinggi waktu singkat (*HTST = High Temperature Short Time*), pasteurisasi pada suhu lebih dari 72⁰C selama lebih dari 15 detik. (4) Pasteurisasi suhu sangat tinggi waktu singkat (*UHT = Ultra High Temperature*), pasteurisasi dengan memanaskan hingga 120⁰-130⁰C selama 2 detik (atau hingga 150⁰C selama 1 detik).

Pada proses pasteurisasi ini, keadaan suhu merupakan bagian terpenting yang harus diperhatikan sehingga tetap stabil.

Oleh karena itu, pada penelitian ini pengendalian suhu merupakan aspek yang ditekankan agar mendapatkan

hasil pasteurisasi susu yang sesuai dengan standar yang telah ditentukan. Penelitian ini akan membuat sistem pasteurisasi susu dengan kontrol otomatis agar suhu dapat dikendalikan dengan stabil. Kontroler PID memiliki konsep penerapan yang sederhana sehingga diharapkan dengan penggunaan PID performa sistem menjadi stabil dan reaksi sistem menjadi cepat serta memiliki keluaran sistem sesuai yang diinginkan.

STUDI PUSTAKA

Dalam penelitian [2], sistem pengendali PID memberikan respon lebih cepat daripada sistem pengendali Fuzzy berdasarkan pengukuran indikator waktu tunda, waktu naik, waktu puncak dan waktu penetapan. Sebaliknya sistem pengendali Fuzzy menghasilkan nilai MSE lebih kecil daripada sistem pengendali PID yang menunjukkan bahwa sistem pengendali Fuzzy memiliki fluktuasi kesalahan lebih kecil daripada sistem pengendali PID dalam proses pasteurisasi susu.

Dalam penelitian [3], dengan menerapkan rumus empiris metode Ziegler-Nichols osilasi teredam masih terjadi overshoot suhu namun osilasi mampu teredam dan cepat mencapai keadaan tunak/stabil. Namun dari beberapa hasil kontrol yang telah digunakan menunjukkan bahwa hasil kendali menggunakan pengendali PID yang menghasilkan kestabilan suhu yang diharapkan.

Dalam penelitian [4], diketahui bahwasespon sistem tanpa menggunakan PID tidak dapat mencapai setpoint yang diinginkan. Dengan digunakannya parameter PID hasil tuning didapatkan respon yang lebih cepat dari pada respon tanpa menggunakan PID, serta dapat mencapai setpoint yang diinginkan.

Dalam penelitian [5], pada kontrol PID, temperatur naik dengan pelan pelan tetapi sangat teratur (step by step) hingga temperatur mencapai titik puncak dan kembali turun lagi. Pada saat pada posisi titik terendah PID sangat lama untuk kembali naik memerlukan 28 detik baru temperature naik kembali.

Dalam penelitian [6], selain mikrokontroler dan PLC, terdapat jenis kontroler lain yang didesain khusus untuk mengontrol suatu proses tertentu. Salah satunya adalah Autonics TK4S-14RN yang merupakan *temperature controller*. Autonics TK4S-14RN didesain memiliki sistem pengukur temperatur menggunakan sensor, sistem pemanas, sistem pendingin, power supply, multi SV setting, dan sistem penampil digital yang terintegrasi menjadi satu unit yang kompak. Sistem kontrol yang ada dapat bekerja secara maksimal dan dikehendaki oleh pengguna dengan mengatur parameter-parameter yang dibutuhkan dengan akurasi $\pm 0,3\%$. Sistem kontrol pada Autonics TK4S14RN diantaranya PID (Proporsional, Integral, dan Defrensial) dan on/off.

Dalam penelitian [7], Pengujian sistem dengan beban menggunakan PID ditunjukkan sistem didapatkan nilai debityang terukur mendekati nilai setpoint, dengan rata – rata prosentase error-nya yaitu 0.9%. Hasil tersebut membuktikan bahwa penambahan kontrol PID membuat sistem lebih stabil dengan nilai error yang dapat ditoleransi. Pada pengujian sistem menggunakan beban dengan PID, laju aliranair dapat kembali ke nilai setpoint ketika sistem diberi hambatan berupa putaran kran air dengan sudut tertentu.

Kinerja kendali PID ini akan optimal dengan penalaan yang baik. Penalaan dilakukan untuk memperoleh konstanta PID yang akan mempengaruhi karakteristik sistem seperti rise time, settling time, overshoot, dan steady state error. Untuk memperoleh nilai konstanta PID suatu sistem dapat dilakukan dengan menggunakan metode Ziegler-Nichols (ZN). Metode ini digunakan karena mudah diterapkan pada sistem yang rumit seperti quadrotor tanpa memerlukan model matematikanya karena bisa langsung diuji coba pada sistem yang akan ditala. Nilai gain yang didapat mungkin akan menghasilkan tanggapan yang kurang baik sehingga memerlukan fine tuning sampai mendapatkan tanggapan sistem yang diinginkan [8].

Pada kendali PID diperlukan tiga parameter yang bisa didapatkan dengan penalaan Ziegler-Nichols. Hasil dari penelitian menunjukkan bahwa respon plant adalah osilasi kontinu dan bisa diatasi dengan menggunakan penalaan osilasi kontinu Ziegler-Nichols. Dengan menggunakan kendali PID pada LabVIEW dan penalaan parameter menggunakan metode Ziegler-Nichols, untuk set point suhu 40°C didapatkan respon plant sebesar $(40 \pm 0,5)^{\circ}\text{C}$. Dengan kata lain pengendalian suhu menggunakan kendali PID dan metode Ziegler-Nichols memiliki error dibawah 2% yang menunjukkan bahwa sistem kendali suhu ini layak untuk digunakan [9].

1. Pasteurisasi Susu

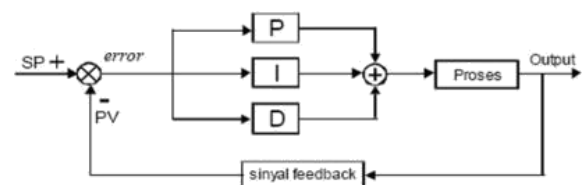
Pasteurisasi merupakan proses pengolahan bahan pangan dan hasil pertanian secara termal dan untuk memperpanjang umur simpan bahan pangan dengan cara inaktivasi sel vegetatif dari mikroorganisme patogen dan pembusuk dengan proses pemanasan, biasanya dilakukan pada suhu antara 65°C sampai 95°C [10].

Pasteurisasi susu dilakukan untuk membuat daya tahan susu menjadi lebih baik. Menurut [1] dalam pasteurisasi susu ada 4 cara dasar yang dapat dilakukan yaitu.

1. Pasteurisasi suhu rendah berkelanjutan (*LTLT = Low Temperature Long Time/Suhu Rendah Waktu Lama*).
2. Pasteurisasi dengan memanaskan hingga $62,2^{\circ}\text{C}$ - 65°C selama 30 menit. Cara ini disebut metode pasteurisasi suhu rendah.
3. Pasteurisasi suhu tinggi berkelanjutan (*HTLT = High Temperature Long Time/Suhu Tinggi Waktu Lama*). Pasteurisasi dengan memanaskan hingga lebih dari 75°C selama lebih dari 15 menit.
4. Metode suhu tinggi waktu singkat (*HTST = High Temperature Short Time*). Pasteurisasi pada suhu lebih dari 72°C selama lebih dari 15 detik. Cara ini adalah metode pasteurisasi yang paling banyak digunakan di seluruh dunia.
5. Pasteurisasi suhu sangat tinggi waktu singkat (*UHT = Ultra High Temperature*). Pasteurisasi dengan memanaskan hingga 120°C - 130°C selama 2 detik (atau hingga 150°C selama 1 detik).

2. Kontrol (Proportional Integral Derivative) PID

Kontrol PID (*Proportional Integral Derivative*) merupakan penggabungan semua dari ketiga mode kontrol (*proportional, integral, dan derivative*) memungkinkan untuk mendapatkan sebuah pengontrol yang tidak mempunyai *error* keadaan tunak serta dapat mereduksi kecenderungan terjadinya osilasi. Kontroler PID menentukan kepresisian suatu sistem instrumentasi dengan karakteristik adanya umpan balik/*feed back* pada sistem tersebut



Gambar 1. Diagram Blok Kontrol PID

Persamaan dibawah ini memperlihatkan bentuk umum PID ideal.

$$CO(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^1 e(\tau) d\tau + T_D \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (1)$$

Atau

$$CO(t) = K_p e(t) + K_1 \int_0^1 e(\tau) d\tau + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (2)$$

Khusus untuk gain Proporsional, beberapa vendor PID komersil seperti Yokogawa dalam produknya

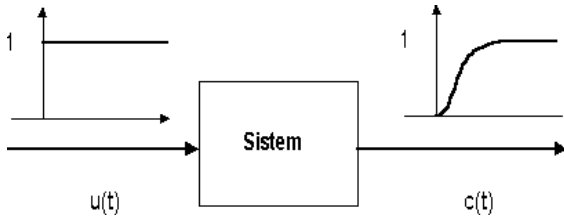
menggunakan istilah *Proporsional Band* (PB) yang dirumuskan oleh persamaan (3) berikut:

$$PB(\%) = \frac{100\%}{K_P} \quad (3)$$

3. Metode Ziegler-Nichols

Metode ini dilakukan dengan menentukan nilai K_P , T_I , dan T_D berdasarkan karakteristik tanggapan peralihan dari *plant* yang diberikan. Metode ini dibagi menjadi Ziegler-Nichols tipe I (*Open Loop*) dan Ziegler-Nichols tipe II (*Closed Loop*).

A. Ziegler-Nichols tipe I (*Open Loop*)

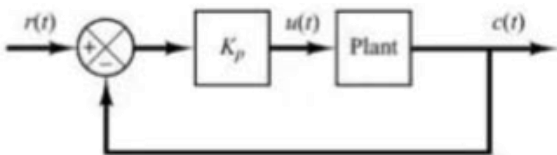


Gambar 2. Diagram Blok *Open Loop*

Dari respon *open loop* yang dihasilkan, parameter-parameter Ziegler-Nichols tipe I (L dan T) dapat didapatkan.

B. Ziegler-Nichols Tipe II (*Closed Loop*)

Dalam tipe II, digunakan sistem *closed loop*. Namun yang digunakan hanya K_P saja, sistem dibuat beresilasi terus-menerus dengan mengatur besarnya nilai K_P



Gambar 3. Diagram Blok *Closed Loop*

Basarnya nilai K_P saat respon sistem beresilasi terus-menerus merupakan nilai K_{cr} . Setelah parameter K_{cr} dan P_{cr} didapatkan, nilai-nilai K_P , T_I , dan T_D bisa dihitung berdasarkan rumus pada tabel 1 berikut ini

Tabel 1. Tabel parameter PID untuk Ziegler-Nichols tipe II

| Tipe Pengendali | K_P | T_I | T_D |
|-----------------|--------------|-----------------------|---------------|
| P | $0,5K_{cr}$ | ∞ | 0 |
| PI | $0,45K_{cr}$ | $\frac{1}{1,2}P_{cr}$ | 0 |
| PID | $0,6K_{cr}$ | $0,5P_{cr}$ | $0,125P_{cr}$ |

- $K_1 = 2 \times \frac{K_P}{T_I} \quad (4)$

- $K_D = K_P \times T_D \quad (5)$

4. Sensor suhu PT100



Gambar 4. Diagram Blok *Open Loop*

Sensor PT100 merupakan tipe sensor RTD (*Resistance Temperature Detector*). RTD adalah sebuah alat yang digunakan untuk menentukan nilai atau besaran suatu temperatur/suhu dengan menggunakan elemen sensitif dari kawat platina, tembaga, atau nikel murni. Sensor RTD PT100 digunakan pada kisaran -200°C sampai 650°C . PT100 merupakan salah satu jenis sensor suhu yang terkenal dengan keakurasiannya.

5. Relay

Relay adalah sebuah alat yang berfungsi sebagai *switch* elektronik dimana penggeraknya terbuat dari lilitan kawat tembaga. *Relay* berfungsi untuk mengontrol sirkuit kelistrikan pada arus yang besar dengan menggunakan sirkuit kelistrikan yang arusnya lebih rendah dan sebagai jugasebagai pengendali sistem.



Gambar 5. *Solid State Relay* (SSR)

Sebuah *Solid State Relay* (SSR) adalah saklar elektronik, yang tidak seperti sebuah *relay* elektromekanis tidak berisi bagian penggerak. SSR ditetapkan sebagai kontrol ON-OFF dimana arus beban dilakukan oleh satu semikonduktor. Perbedaan utama adalah SSR tidak memiliki bagian mekanik yang bergerak didalamnya. Pada dasarnya, ini adalah perangkat elektronik yang bergantung pada listrik, magnetik, dan optiksemi konduktor.

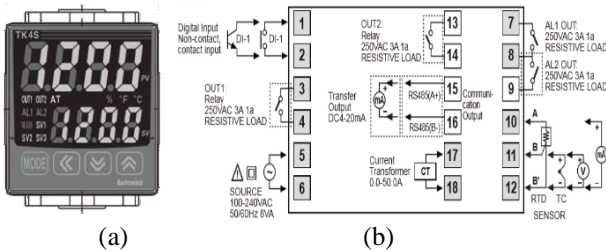
6. Kompor Listrik

Kompor listrik induksi dalam penelitian ini digunakan untuk menghasilkan panas yang dapat membantu proses pasteurisasi. Kompor listrik ini memiliki rentang kerja daya antara 300-600Watt. Kompor induksi bekerja akibat efek induksi yang diakibatkan oleh arus listrik yang melewati kumparan yang ada dalam kompor tersebut



Gambar 6. Kompor Listrik

7. Temperature Controller Kontrol PID seri TK4S



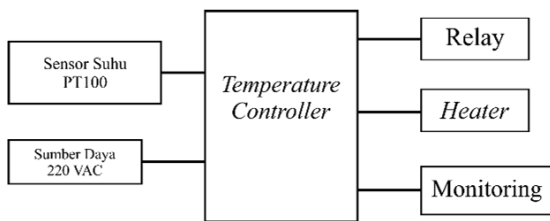
Gambar 7. (a) Tampilan Depan TK4S (b) Connection Pin TK4S

Temperature controller kontrol PID seri TK4S merupakan standar kontrol temperatur PID. Alat ini dapat mewujudkan kontrol yang lebih kuat dengan siklus pengambilan sampel dalam waktu 50 ms dan memiliki akurasi tampilan +/-0,3%. Kontrol ini mendukung beragam kontrol termasuk kontrol perubahan pemanasan dan pendinginan, pengendalian otomatis, dan fungsi komunikasi. TK4S juga mendukung beragam sensor, multi SV setting, SSR drive output + current output, dan tampilan resolusi tinggi.

METODE/DESAIN

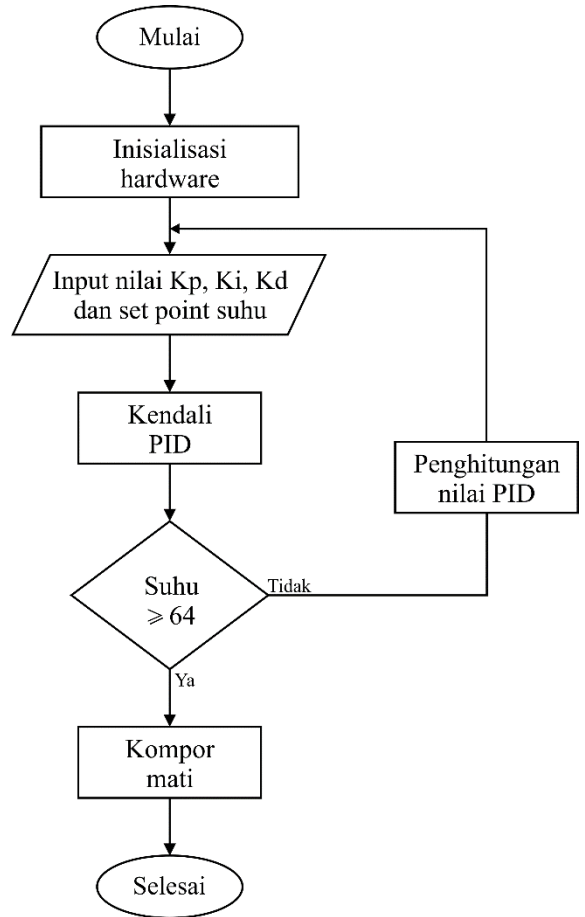
1. Melakukan Perancangan Pada Hardware

Perancangan hardware secara umum meliputi unit input dan output pada temperature controller. Hardware sistem pengendali suhu pada pasteurisasi susu diperlukan guna mendukung kinerja yang digunakan sistem untuk menghasilkan output sistem yang baik



Gambar 8. Blok Diagram Sistem Pengendalian Suhu Pasteurisasi Susu

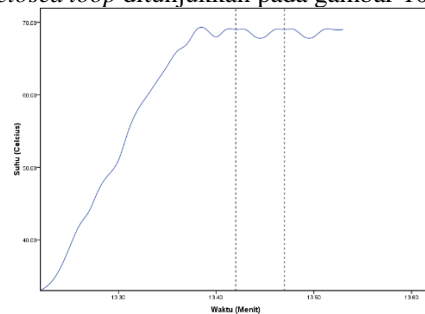
2. Perancangan Sistem



Gambar 9. Flowchart Sistem Pasteurisasi Susu dengan PID

3. Menentukan Nilai KP, KI, dan KD dengan Metode Ziegler-Nichols Tipe II (Close Loop)

Metode yang digunakan untuk menentukan nilai PID yaitu dengan menggunakan metode Ziegler-Nichols tipe II. Dalam menentukan nilai parameter PID dengan menggunakan respon yang diatur dengan slider gain sehingga respon berhasil. Percobaan dilakukan dengan menggunakan kontrol proporsional, KI dan KD di set 0. Respon closed loop ditunjukkan pada gambar 10 berikut.



Gambar 10. Grafik Respon Closed Loop

Nilai KP saat respon beresilasi terus- menerus merupakan nilai Kcr. Selanjutnya yaitu mencari nilai priode kritis atau disebut Pcr. Dari proses osilasi pada pengujian kontrol proportional diperoleh nilai $K_{cr} = 11$ dan $P_{cr} = 300$ detik. Setelah ini Kcr dan Pcr diperoleh, dimasukan ke rumus-rumus PID Ziegler Nichols II, maka diperoleh.

$$K_p = 0,6K_{cr} = 0,6 \times 11 = 6,6$$

$$T_i = 0,5P_{cr} = 0,5 \times 300 = 150$$

$$T_d = 0,125P_{cr} = 0,125 \times 300 = 38$$

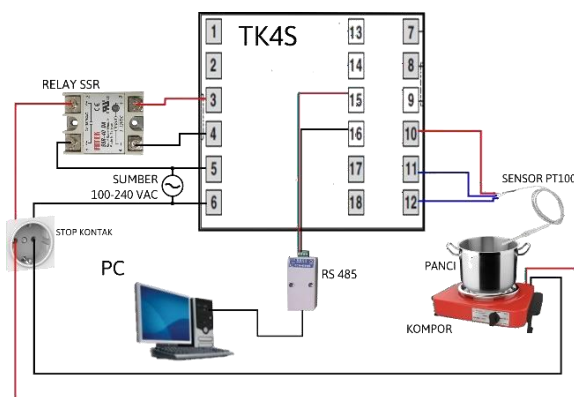
$$\%PB = \frac{1}{6,6} \times 100\% = 15$$

Maka konstanta dari Ki dan Kd dapat diperoleh dengan menggunakan rumus berikut.

$$K_i = 2 \times \frac{K_p}{T_i} = 2 \times \frac{6,6}{150} = 0,088$$

$$K_D = K_p \times T_D = 6,6 \times 38 = 250,8$$

4. Desain Mekanik Sistem



Gambar 11. Desain Mekanik Sistem

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Pengujian Sensor Suhu PT100

Pengujian ini dilakukan dengan membandingkan antara sensor PT100 dengan termometer. Hasil pengujian sensor suhu PT100 dapat dilihat dalam tabel 2.

Tabel 2. Hasil Pengujian Sensor PT100

| No | Suhu Termometer (0C) | Sensor PT100 (0C) | Error (0C) |
|-----------------|----------------------|-------------------|-------------|
| 1. | 26 | 26 | 0 |
| 2. | 31 | 31 | 0 |
| 3. | 35 | 35 | 0 |
| 4. | 39 | 39 | 0 |
| 5. | 45 | 46 | 1 |
| 6. | 49 | 49 | 0 |
| 7. | 55 | 55 | 0 |
| 8. | 58 | 59 | 1 |
| 9. | 60 | 60 | 0 |
| 10. | 64 | 64 | 0 |
| Rata-rata error | | | 0.2 |

Dalam pengujian ini, suhu dibuat antara 260-640C. Hasil dari pengujian sensor suhu PT100 menunjukkan bahwa sensor memiliki kemampuan pembacaan yang cukup akurat dengan nilai rata-rata error sebesar 0.20C.

2. Pengujian Dengan Metode KontrolPID (Auto Tunning)

Hasil merupakan capaian kegiatan penelitian yang telah dilakukan. Hasil dapat berupa tabel atau grafik. Pembahasan menjelaskan hasil yang telah dicapai, juga membandingkan hasil yang telah dicapai dengan hasil dari penelitian sebelumnya. Keterbaruan juga dapat diperlihatkan berdasarkan hasil yang telah diperoleh.

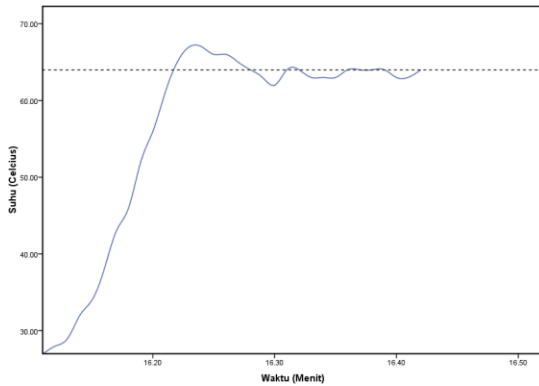
Pengujian respon sistem dilakukan dengan mengatur *set point* sebesar 64⁰C. Dari nilai suhu tersebut dapat diketahui respon yang dihasilkan untuk mencapai titikstabil dengan menggunakan nilai *PB*, *Ti*, dan *TD* yang sudah didapatkan dengan cara *auto tuning*. Hasil dari *auto tuning* ini menghasilkan nilai *PB* = 1.4; *Ti* = 59; dan *TD*= 12. Dibawah ini merupakan tabel hasil pengujian dengan menggunakan control PID.

Tabel 3. Tabel Hasil Pengujian kontrol PID (Auto Tunning)

| No. | Waktu (Menit) | Suhu (Celcius) |
|-----|---------------|----------------|
| 1. | 16.11 | 27 |
| 2. | 16.12 | 28 |
| 3. | 16.13 | 29 |
| 4. | 16.14 | 32 |
| 5. | 16.15 | 34 |
| 6. | 16.16 | 38 |
| 7. | 16.17 | 43 |
| 8. | 16.18 | 46 |
| 9. | 16.19 | 52 |
| 10. | 16.20 | 56 |
| 11. | 16.21 | 61 |
| 12. | 16.22 | 65 |
| 13. | 16.23 | 67 |
| 14. | 16.24 | 67 |
| 15. | 16.25 | 66 |
| 16. | 16.26 | 66 |
| 17. | 16.27 | 65 |
| 18. | 16.28 | 64 |
| 19. | 16.29 | 63 |
| 20. | 16.30 | 62 |
| 21. | 16.31 | 64 |
| 22. | 16.32 | 64 |
| 23. | 16.33 | 63 |
| 24. | 16.34 | 63 |
| 25. | 16.35 | 63 |
| 26. | 16.36 | 64 |

| | | |
|-----|-------|----|
| 27. | 16.37 | 64 |
| 28. | 16.38 | 64 |
| 29. | 16.39 | 64 |
| 30. | 16.40 | 63 |

Dari percobaan tersebut diperoleh nilai rata-rata *error* sebesar 0,3%, *overshoot* 0,67%, *settling time* dengan waktu 25 menit, dan *rise time* sebesar 11 menit, berikut grafik dari perubahan nilai suhu pada sistem pasteurisasi dengan kontrol PID (*auto tuning*), ditunjukkan dengan gambar 12



Gambar 12. Grafik Respon Sistem PID (Auto Tuning) Pada Pasteurisasi Susu

3. Pengujian Dengan Metode Kontrol PI

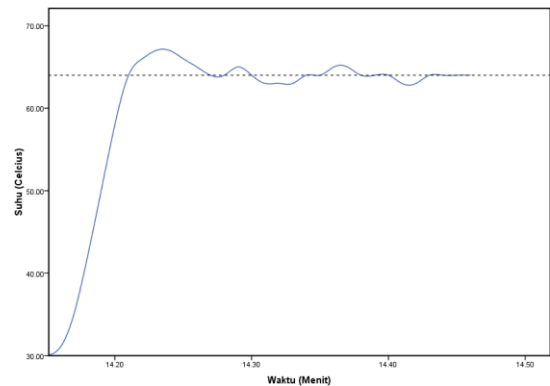
Nilai PI yang diberikan pada pengujian ini yaitu $PB = 15$ dan $TI = 150$ pengujian ini dilakukan pada suhu awal $30^{\circ}C$ dan setpoint suhu sebesar $64^{\circ}C$ selama 30 menit. Tabel 4 merupakan hasil pengujian dengan menggunakan kontrol PI

Tabel 4. Tabel Hasil Pengujian kontrol PI

| No. | Waktu (Menit) | Suhu (Celcius) |
|-----|---------------|----------------|
| 1. | 14.15 | 30 |
| 2. | 14.16 | 31 |
| 3. | 14.17 | 35 |
| 4. | 14.18 | 42 |
| 5. | 14.19 | 50 |
| 6. | 14.20 | 58 |
| 7. | 14.21 | 64 |
| 8. | 14.22 | 66 |
| 9. | 14.23 | 67 |
| 10. | 14.24 | 67 |
| 11. | 14.25 | 66 |
| 12. | 14.26 | 65 |
| 13. | 14.27 | 64 |
| 14. | 14.28 | 64 |
| 15. | 14.29 | 65 |
| 16. | 14.30 | 64 |
| 17. | 14.31 | 63 |

| | | |
|-----|-------|----|
| 18. | 14.32 | 63 |
| 19. | 14.33 | 63 |
| 20. | 14.34 | 64 |
| 21. | 14.35 | 64 |
| 22. | 14.36 | 65 |
| 23. | 14.37 | 65 |
| 24. | 14.38 | 64 |
| 25. | 14.39 | 64 |
| 26. | 14.40 | 64 |
| 27. | 14.41 | 63 |
| 28. | 14.42 | 63 |
| 29. | 14.43 | 64 |
| 30. | 14.44 | 64 |

Dari percobaan tersebut diperoleh nilai rata-rata *error* sebesar 0,3%, *overshoot* 0,67%, *settling time* dengan waktu 22 menit, dan *rise time* sebesar 5 menit, berikut grafik dari perubahan nilai suhu pada sistem pasteurisasi dengan kontrol PI, ditunjukkan dengan gambar 13.



Gambar 13. Grafik Respon Sistem PI Pada Pasteurisasi Susu

4. Pengujian Dengan Kontrol PID (Manual Tuning)

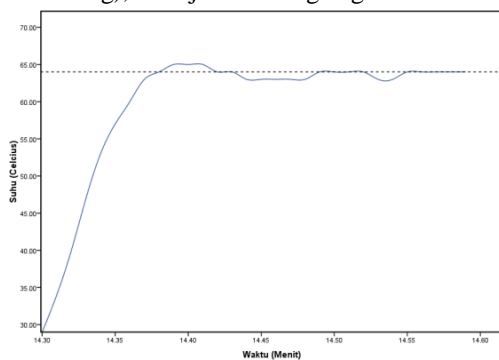
Pada pengujian terakhir dilakukan pengujian PID dengan manual tuning. Untuk mencapai titik stabil PID menggunakan metode Ziegler-Nichols tipe II. Besar nilai yang diberikan yaitu $PB = 15$; $TI = 150$; dan $TD = 38$. Berikut hasil pengujian dengan menggunakan kontrol PID pada tabel 5.

Tabel 5. Tabel Hasil Pengujian kontrol PID (*Manual Tuning*)

| No | Waktu (Menit) | Suhu (Celcius) |
|----|---------------|-----------------|
| 1. | 14.30 | 29 |
| 2. | 14.31 | 34 |
| 3. | 14.32 | 40 |
| 4. | 14.33 | 47 |
| 5. | 14.34 | 53 |
| 6. | 14.35 | 57 |
| 7. | 14.36 | 60 |

| | | |
|-----|-------|----|
| 8. | 14.37 | 63 |
| 9. | 14.38 | 64 |
| 10. | 14.39 | 65 |
| 11. | 14.40 | 65 |
| 12. | 14.41 | 65 |
| 13. | 14.42 | 64 |
| 14. | 14.43 | 64 |
| 15. | 14.44 | 63 |
| 16. | 14.45 | 63 |
| 17. | 14.46 | 63 |
| 18. | 14.47 | 63 |
| 19. | 14.48 | 63 |
| 20. | 14.49 | 64 |
| 21. | 14.50 | 64 |
| 22. | 14.51 | 64 |
| 23. | 14.52 | 64 |
| 24. | 14.53 | 63 |
| 25. | 14.54 | 63 |
| 26. | 14.55 | 64 |
| 27. | 14.56 | 64 |
| 28. | 14.57 | 64 |
| 29. | 14.58 | 64 |
| 30. | 14.59 | 64 |

Dari percobaan tersebut diperoleh nilai rata-rata error sebesar 0,1%, overshoot 0,65%, settling time dengan waktu 19 menit, dan rise time sebesar 8 menit, berikut grafik dari perubahan nilai suhu pada sistem pasteurisasi dengan kontrol PID (manual tuning), ditunjukkan dengan gambar 14.



Gambar 14. Grafik Respon Sistem PID Pada Pasteurisasi Susu

5. Pembahasan

Berdasarkan karakteristik dari sistem pasteurisasi susu dengan cara suhu rendah berkelanjutan (*LTLT = Low Temperature Long Time/Suhu Rendah Waktu Lama*). Pasteurisasi dengan memanaskan hingga 62,2^o-65^oC selama 30 menit. Cara ini disebut metode pasteurisasi suhu rendah. Maka metode PID dengan manual tuning yang paling baik karena overshoot dari metode tuning tersebut cukup rendah.

Berikut tabel perbandingan antara uji metode yang dilakukan.

Tabel 6. Perbandingan Hasil Uji Metode

| Metode | Error | Overshoot | Settling Time | Rise time |
|---------------------|-------|-----------|---------------|-----------|
| PID (Auto Tuning) | 0,12% | 0,67% | 25 menit | 11 menit |
| PI | 0,13% | 0,67% | 22 menit | 5 menit |
| PID (Manual Tuning) | 0,1% | 0,65% | 19 menit | 8 menit |

6. Pengujian Kualitas Susu

Pengujian kualitas susu dilakukan agar hasil yang diperoleh dari pasteurisasi dapat memperoleh hasil yang sesuai dengan kebutuhan. Susu memiliki daya tahan yang baik dan tahan lama. Berdasarkan pengujian yang dilakukan susu pada suhu normal bisa dibedakan berdasarkan sisi warnanya maupun dari tekstur dan bau susu. Susu hasil pasteurisasi yang diuji menghasilkan daya tahan yang lama yaitu dapat bertahan selama 1 hari. Pada saat hari ke 2 tekstur susu sudah hancur dan aromanya menyengat.



Gambar 15. Susu Hasil Pasteurisasi

KESIMPULAN DAN SARAN

1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan didapatkan kesimpulan sebagai berikut.

1. Pengujian sistem yang dilakukan secara otomatis untuk dapat mengatur temperatur suhu pasteurisasi susu dengan menggunakan metode PID mendapatkan mode manual tuning yang paling baik.
2. Sistem pengendali PID dengan penalaan Ziegler-Nichols tipe II diperoleh nilai $PB = 15$; $TI = 150$; $TD = 38$ sehingga memiliki unjuk kerja yang baik karena ini mampu mencapai dan mempertahankan suhu pada referensi yang diinginkan.
3. Pengujian respon sistem menggunakan referensi tetap 64^oC selama 30 menit dan menghasilkan nilai rata-rata error sebesar 0,1%, overshoot 0,65%, settling time dengan waktu 19 menit, dan rise time sebesar 8 menit.

4. Karakteristik pada sistem *temperature controller* kontrol PID seri TK4S memberikan kemudahan dalam pemrograman yaitu melalui proses penentuan parameter-parameter padapengendalian suhu.

Pengujian susu ditempat ruangan dengan suhu normal, susu dapat bertahan hingga 1 hari, sehingga bisa dikatakan susu memiliki daya tahan yang baik.

2. Saran

Berdasarkan penelitian yang dilakukan maka peneliti memiliki saran agar pengembangan terus berlanjut. Adapun saran sebagai berikut:

1. Menerapkan penggunaan *Unit Power Suplay* sebagai *buckup* daya apabila terjadi gangguan pada listrik PLN dan menerapkan sistem monitoring secara online.
2. Dapat menggunakan metode pengendalian temperatur yang bisa dikembangkan seperti logika *fuzzy* (FLC) dan jaringan syaraf tiruan (JST) agar mengurangi *steady state*.

Untuk pengembangan lanjutan, dapat menggunakan kontrol jenis lain dan sensor suhu yang lebih baik.

REFERENSI

- [1] H. Shinya, *The Miracle Of Enzyme: Self-Healing Program*, II. Bandung: Qanita, 2008.
- [2] Y. Triwidyastuti, M. Nizar, J. Jusak, P. Studi, and S. Komputer, "Pengendali Suhu pada Proses Pasteurisasi Susu dengan Temperature Control For Milk Pasteurization Utilizing The Proportional-Integral-Derivative (PID) And Fuzzy Sugeno Method," *J. Teknol. Inf. dan Ilmu Komput.*, vol. 9, no. 4, pp. 335-362, 2019.
- [3] T. B. Pratomo, A. Dharmawan, A. Syoufian, T. W. Supardi, and J. Kimia, "Purwarupa Sistem Kendali Suhu dengan Pengendali PID pada Sistem Pemanas dalam Proses Refluks/Distilasi," *IJEIS*, vol. 3, no. 1, pp. 23-34, 2013.
- [4] I. Kustanti, "Pengendalian Kadar Keasaman (pH) Pada Sistem Hidroponik Stroberi Menggunakan Kontroler PID Berbasis Arduino Uno," *J. Mhs. TEUB*, vol. 2, no. 1, pp. 1-6, 2014. J. Clerk Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, 3rd ed., vol. 2. Oxford: Clarendon, 1892, pp. 68-73.
- [5] M. T. Widadi, "Analisa Model Pengendalian Temperatur Proses Pasteurisasi Pada PT X Dengan Membandingkan PID Control Dengan System Anfis," vol. 5, no. 1, pp. 38-43, 2014.
- [6] D. S. Astuti, A. Aminudin, and Waslaluddin, "Analisis Karakteristik Sistem Kontrol Temperatur Berbasis Autronics TK4S-14RN Untuk Prototipe Pengereng Bahan Pakaian," *Wahana Fis.*, vol. 4, no. 1, pp. 12-20, 2019.
- [7] A. Ainurrohman, M. Rivai, and T. Tasripan, "Kontrol Laju Alir Pompa Air Berpenggerak Brushless DC Motor," *J. Tek. ITS*, vol. 7, no. 2, 2019.
- [8] P. A. Kusuma and A. Dharmawan, "Pengendalian Kestabilan Ketinggian pada Penerbangan Quadrotor dengan Metode PID Fuzzy," vol. 7, no. 1, pp. 61-70, 2017.
- [9] D. A. Tyas and R. Sumiharto, "Purwarupa Sistem Kendali PID: Studi Kasus Kendali Suhu Ruang," *IJEIS*, vol. 3, no. 1, pp. 95-104, 2013.
- [10] E. Waziroh, D. Y. Ali, and Nur Istianah, *Proses Termal Pada Pengolahan Pangan*. Malang: UB Press, 2017.