

Perancangan Sistem Pengendalian Temperatur pada Proses Pemanasan dengan Listrik Menggunakan Motor Servo sebagai Aktuator

Azhar^{1,*}, Yuli Darni², Donny Lesmana², Muhammad Muslim Irfan¹, Yoga Riyanto³

¹Laboratorium Fisika Teknik, Teknik Kimia, Universitas Lampung

²Laboratorium Rekayasa Polimer, Teknik Kimia, Universitas Lampung

³P.T. Pindo Deli Pulp and Paper, Karawang, Jawa Barat

*E-mail: azhar@eng.unila.ac.id

Abstract

Article history:

Received: 27-02-2025

Accepted: 12-04-2025

Published: 25-04-2025

Keywords:

actuator,
electrical heating
servo motor,
temperature control,

The heating process is very common in many industrial fields. The heating process usually uses steam as a heating medium, especially in large-scale industries. In small-scale industries, heating with electricity is more effective and energy efficient. This study aims to examine the ability of the servo motor as an actuator to regulate the temperature in the electric heating process. The servo motor used is MG995 DC (5 Volt) with a rotation of 180° and a torque of 10 kgf/cm. The servo motor is used to rotate the potentiometer lever to regulate the power supply to the heating system. This servo motor is controlled by a PID control system with feedback input parameters in the form of DC voltage obtained from the conversion of the process temperature value (°C) using a type-K thermocouple with a sensitivity of 41µV/°C. The feedback voltage from the amplified thermocouple voltage is then compared with the set point voltage (the desired process temperature value). The results of the study indicate that the servo motor can work well as an actuator to maintain the process temperature because of its accuracy in regulating the potentiometer rotation position with a PWM control range between 5% and 10%. Based on the findings of this study, it can be said that servo motors can be used as accurate actuators in regulating the supply of electrical power for electrical heating systems in industry.

1. Pendahuluan

Temperatur adalah takaran rata-rata energi kinetik partikel dalam suatu objek. Temperatur memainkan peran penting dalam berbagai proses fisika-kimia-biologi, terkhusus pada proses-proses termal yang melibatkan transfer panas. Oleh sebab itu pengendalian temperatur menjadi penting dalam teknologi proses maupun manufaktur karena berpengaruh terhadap kelajuan proses dan kualitas produk. Selain itu, pengendalian temperatur juga dapat menghemat biaya operasi dan berdampak baik terhadap keselamatan dan lingkungan. Pengendalian temperatur telah diterapkan secara meluas dalam berbagai bidang teknologi seperti proses reaksi kimia, metalurgi, pemrosesan bahan makanan, farmasi, bioteknologi, dan sebagainya.

Pada umumnya dalam industri proses kimia, *steam* digunakan sebagai media pemanasan karena hemat biaya terutama apabila jumlah panas yang dibutuhkan lebih dari 1 MW. Biaya operasi untuk penggunaan *steam* lebih rendah dari pada penggunaan listrik yang empat hingga lima kali lebih besar per kWh. Namun demikian, dalam hal efisiensi, pemanas listrik efisiensinya mendekati 99% sedangkan

efisiensi pemanasan dengan *steam* kurang dari 85%, tergantung pada jenis bahan bakar yang digunakan [1].

Penggunaan pemanas listrik akan semakin meluas dimasa depan baik karena alasan yang telah disebutkan di atas maupun karena alasan rendahnya emisi CO₂. Oleh karena itu perhatian terhadap sistem pengendalian temperatur pada proses-proses yang menggunakan pemanas listrik menjadi semakin penting baik dalam industri proses kimia maupun untuk keperluan di laboratorium.

Teknik pengendalian temperatur dengan pemanas listrik biasanya mengadopsi sistem pengendalian ON-OFF (diskrit). Sistem ini dipakai karena dari segi biaya lebih rendah, sederhana dalam pengaturan; dan sistem ini hanya cocok untuk proses-proses yang tidak membutuhkan stabilitas yang tinggi.

Ini berarti bahwa untuk proses-proses yang memerlukan stabilitas yang tinggi harus menggunakan sistem pengendalian dengan aktuator yang bersifat sinambung (kontinyu) dan akurat. Aktuator kontinyu yang umum dipakai adalah motor listrik jenis *stepper motor* untuk memutar *control valve* guna mengatur laju alir media (fluida) pemanas atau pendingin.

Stepper motor mempunyai karakteristik yang dapat mengatur kecepatan dan posisi dalam sistem kontrol terbuka. Metode yang dipakai untuk mengontrol *stepper motor* adalah dengan menggunakan pulsa sinyal listrik dengan konfigurasi nilai frekuensi tertentu dan banyaknya pulsa sinyal listrik yang dikirimkan [2]. Beberapa kelemahan dari *stepper motor* adalah memerlukan rangkaian kontrol yang relatif rumit, mengkonsumsi arus listrik yang relatif besar, torsi berkurang pada kecepatan tinggi, dan dapat menimbulkan resonansi apabila tidak dikontrol secara tepat [3].

Dibandingkan dengan *stepper motor*, *servo motor* memiliki derajat putaran yang lebih kecil ($0,036^\circ$), torsi *output* konstan, dapat diaplikasikan pada sistem kontrol tertutup, serta respon yang lebih cepat [4].

Oleh karena itu kajian tentang aplikasi motor servo telah menarik perhatian beberapa peneliti, misalnya untuk menentukan karakteristik performa parameter kendali PID [5], aplikasi gerak robot [6], pemodelan untuk sistem kendali yang mengendalikan motor servo [7], penggunaan servo motor sebagai pengatur posisi [8-9], termasuk kajian-kajian tentang teknik kendali servo motor [10].

Hasil kajian di atas menunjukkan bahwa motor servo dapat digunakan sebagai aktuator baik untuk gerak linear maupun gerak putar serta cocok untuk sistem yang membutuhkan ketelitian yang tinggi, tahan terhadap pengaruh resonansi, dan respon yang cepat. Oleh karena itu kombinasi antara rangkaian pengendali PID dengan motor servo dapat menghasilkan performa kontrol yang lebih baik.

Pada penelitian ini, motor servo digunakan sebagai aktuator yang berfungsi untuk mengatur daya listrik output pada perangkat regulator tegangan AC berdasarkan nilai temperatur proses yang dikombinasikan dengan sistem pengendalian PID. Tujuan dari penelitian adalah untuk menganalisis kinerja dari sistem pengendalian temperatur yang berbasis pada aktuator motor servo.

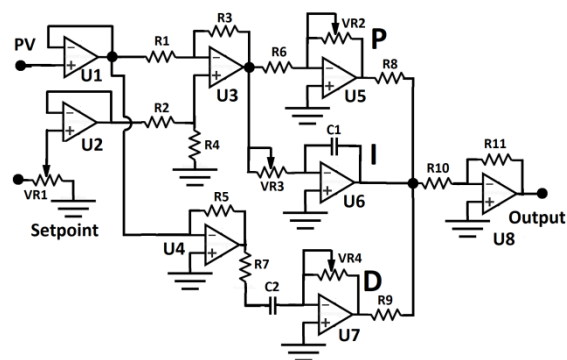
2. Metode

Sistem pengendalian temperatur yang dirancang melibatkan sejumlah komponen yang meliputi sirkuit kendali PID, *regulator* tegangan AC (4000 W), pemanas listrik (*strip heater*) 600 W dengan dimensi 23 cm x 13 cm, termokopel type-K plus amplifier, termometer digital, bak

pelelehan timah dengan dimensi 24 cm x 14 cm x 2 cm dan motor servo (DC 5V, putaran poros 180°) sebagai aktuator untuk regulasi daya listrik AC. Sistem komunikasi elektronika antar bagian sistem menggunakan rangkaian analog.

2.1 Rangkaian PID

Rangkaian elektronika untuk PID diperlihatkan pada Gambar 1 [11].



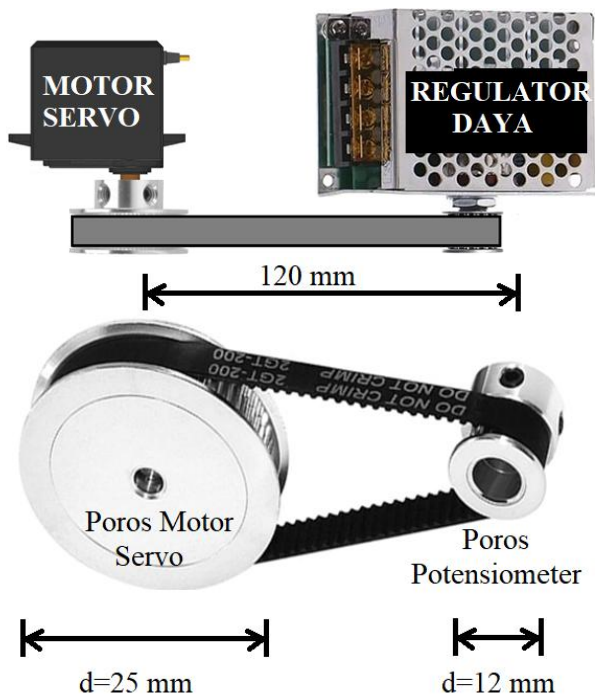
Gambar 1. Rangkaian kendali PID. OpAmp adalah LM358.

Gambar 1 memperlihatkan rangkaian sederhana yang terdiri dari delapan buah opamp. U1 dan U2 berfungsi sebagai *buffer* untuk variabel proses dan *set point*, U3 sebagai *error detector* dan U4 sebagai penguat untuk variabel proses. Adapun U5 sebagai rangkaian proporsional ($K_p = VR2/R6$), U6 sebagai rangkaian integral ($K_i = 1/VR3.C1$), dan U7 sebagai rangkaian derivatif ($K_d = VR4.C2$), sedangkan U8 sebagai *totalizer* dan *inverter* yang outputnya diumpankan ke sub-sistem aktuator.

2.2 Aktuator

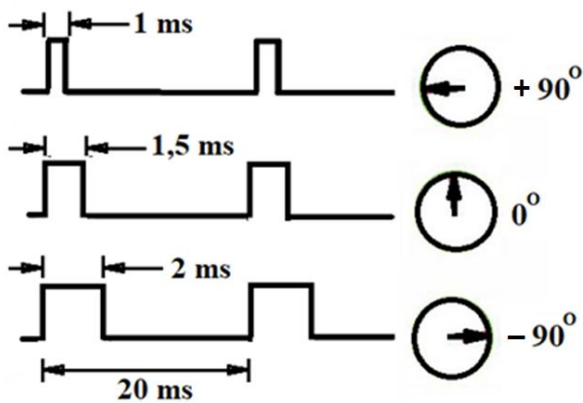
Sub-sistem aktuator motor servo dirangkai seperti diperlihatkan pada Gambar 2. Poros motor servo dapat berputar dalam rentang -90° hingga $+90^\circ$ (total 180°), sedangkan poros potensiometer pada regulator daya AC dapat berputar sejauh 270° . Oleh karena itu, agar poros potensiometer dapat berputar secara maksimal maka *pulley* untuk poros motor servo dibuat dua kali lebih besar diameternya daripada ukuran *pulley* pada poros potensiometer.

Motor servo yang digunakan memiliki torka diam (*stall torque*) sebesar 8,5 kgf.cm (pada 4,8 volt) dan 10 kgf.cm (pada 6 volt). Nilai ini lebih dari cukup untuk memutar poros potensiometer yang memiliki torka rotasi sekitar 70 hingga 100 gf.cm.



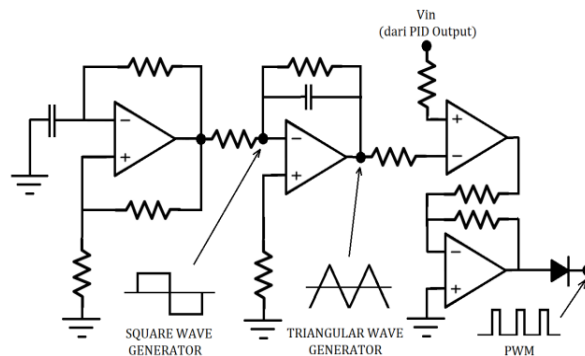
Gambar 2. Sub-sistem aktuator motor servo dan regulator daya listrik AC.

Besar derajat putaran poros motor servo tergantung pada lebar sinyal pulsa PWM, seperti diperlihatkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Diagram pulsa waktu untuk motor servo.

Derajat putaran poros motor servo tergantung pada lebar sinyal PWM antara 1 ms hingga 2 ms dengan periode waktu sekitar 20 ms pada frekuensi 50 Hz. Untuk menghasilkan pulsa tegangan seperti pada Gambar 3 digunakan rangkaian elektronika seperti diperlihatkan pada Gambar 4.



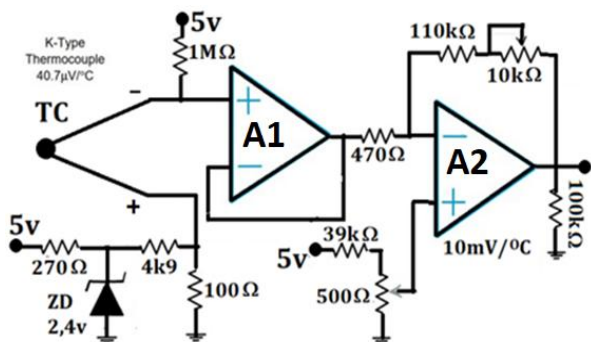
Gambar 4. Rangkaian pengaturan lebar pulsa PWM berdasarkan tegangan output dari rangkaian PID. Op.Amp adalah LM358.

Rangkaian pada Gambar 4 dirancang untuk menghasilkan lebar pulsa PWM dengan *duty cycle* antara 4% hingga 12% agar dapat diterapkan pada motor servo yang beroperasi pada *duty cycle* 5% hingga 10% yang berkaitan dengan derajat putaran porosnya. *Duty cycle* yang dihasilkan tergantung pada besar tegangan dari output kendali PID antara 4,5 V (12%) hingga 5,5 V (4%).

2.3 Penguat Sinyal Termokopel

Termokopel adalah elemen sensor temperatur yang bekerja berdasarkan prinsip efek Seebeck dimana apabila dua bahan logam yang berbeda disambung pada ujung-ujungnya akan timbul beda potensial listrik antara ke dua ujungnya jika berbeda temperatur. Dalam penelitian ini digunakan termokopel type-K karena linieritasnya yang baik dan dapat bekerja pada temperatur yang relatif tinggi (-200°C sampai 1260°C dengan titik leleh 1400°C. Sensitivitas termokopel type-K sekitar 41µV /°C [12].

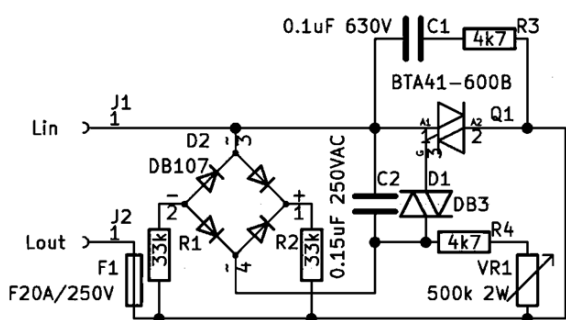
Karena nilai potensial tegangan yang dihasilkan oleh termokopel cukup kecil maka sinyalnya harus diperkuat. Rangkaian penguat sinyal termokopel diperlihatkan pada Gambar 5. Output rangkaian ini diatur hingga menghasilkan nilai kelajuan perubahan tegangan terhadap perubahan temperatur sebesar 10mV/°C, yang untuk selanjutnya diumpankan sebagai variabel proses ke rangkaian PID (Gambar 1), sedangkan ujung termokopel (TC) dimasukkan ke alat proses yang akan dikendalikan temperaturnya.



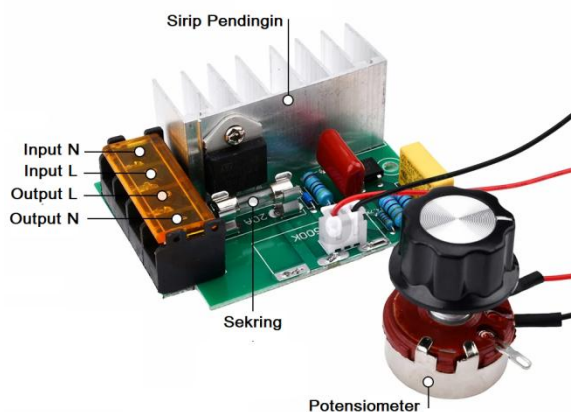
Gambar 5. Penguat sinyal termokopel. A1 dan A2 adalah LM358.

2.4 Regulator Daya Listrik

Regulator daya listrik (Gambar 6 [13]), adalah perangkat kelistrikan yang digunakan untuk menyalurkan energi listrik ke *strip heater*.



(a)



(b)

Gambar 6. Rangkaian regulator daya listrik (a) dan bentuk fisiknya (b).

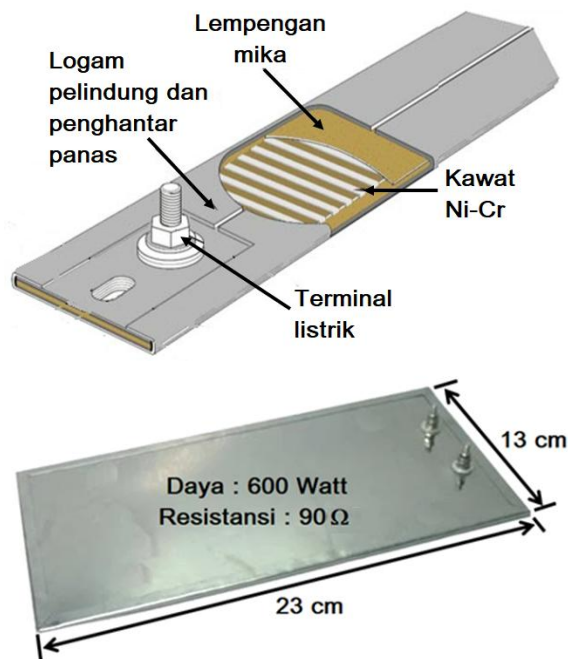
Prinsip kerjanya adalah dengan pengaturan fasa listrik menggunakan TRIAC (BTA41) yang dapat menghantarkan arus AC dalam dua arah. Bentuk fasa listrik dapat diatur melalui terminal GATE dari TRIAC dengan cara pengaturan tegangan konduksi dalam waktu tertentu oleh rangkaian RC (VR1+R4) dan C2 serta DIAC (DB3). Dengan mengatur resistansi

VR1 (potensiometer) akan diperoleh bentuk fasa listrik yang tertentu pula sehingga pada akhirnya akan berpengaruh terhadap daya listrik yang disuplai ke *strip heater*.

Poros potensiometer (VR1) ini akan diputar oleh motor servo berdasarkan lebar pulsa yang diterimanya dan ini tergantung pada besar nilai temperatur yang dikendalikan oleh termokopel yang nilai tegangannya (setelah amplifikasi) dibandingkan dengan set-point.

2.5 Strip Heater

Strip heater adalah pemanas yang mengkonversikan energi listrik menjadi energi panas. Bentuknya berupa lempengan dengan ukuran panjang 23 cm dan lebarnya 13 cm sepertindiperlihatkan pada Gambar 7.

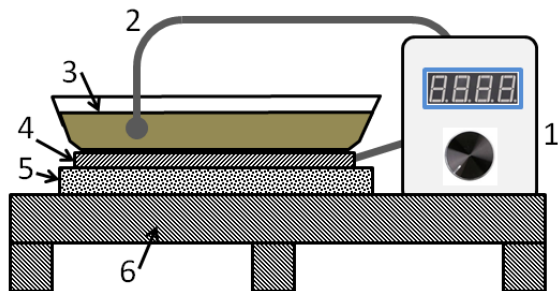


Gambar 7. Strip heater

Elemen utama dari pemanas ini adalah kawat logam yang terbuat dari paduan Nikel-Kromium (Ni-Cr) yang tahan temperatur tinggi. Kawat ini dililitkan pada lempengan mika dengan jumlah lilitan (atau panjang kawat tertentu) sesuai dengan besar daya (resistansi) yang didesain. Kawat yang telah dililit ini kemudian diisolasi lagi dengan mika agar tidak terjadi hubung singkat dengan lapisan logam penghantar panas yang menutupinya secara keseluruhan. Lempengan logam penutup ini terbuat dari *stainless steel*.

Masing-masing sub-sistem tersebut diuji terlebih dahulu kinerjanya secara terpisah baik secara simulasi (PID dan PWM generator)

maupun uji nyata. Setelah itu sistem dirangkai secara keseluruhan seperti ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Sketsa sistem pengendalian temperatur. 1 modul pengendalian, 2 termokopel, 3 bak peleburan, 4 strip heater, 5 busa isolasi panas, dan 6 bangku.

3. Hasil dan Pembahasan

Pengujian pertama dilakukan terhadap rangkaian kendali PID secara simulasi untuk mode proporsional (tanpa integral dan derivatif) dengan input step sebesar 1. Hasil pengujian menunjukkan bahwa terdapat *steady state error*, SSE (*Set Point* - Nilai Akhir) yang dapat dinyatakan dengan persamaan eksponensial:

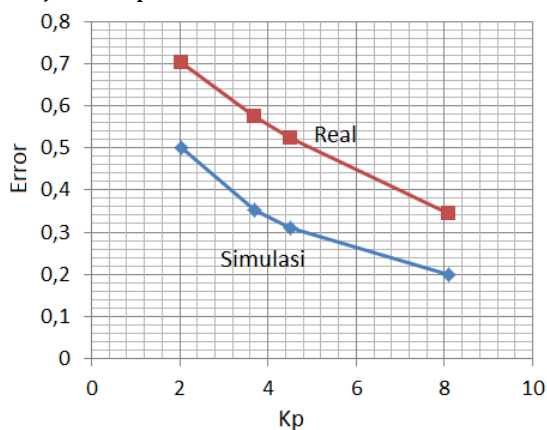
$$e_{ss(sim)} = 0,6312e^{-0,146K_p} \quad (1)$$

dengan K_p adalah konstanta proporsionalitas. Ini menunjukkan bahwa semakin besar nilai K_p menyebabkan nilai error semakin mengecil [14].

Sementara itu, dari hasil percobaan nyata menunjukkan bahwa SSE lebih besar dibandingkan dengan simulasi yang dapat dinyatakan dengan persamaan (2).

$$e_{ss(real)} = 0,8904e^{-0,118K_p} \quad (2)$$

Persamaan (1) dan (2) diplot seperti ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Hubungan antara nilai K_p dengan SSE.

Adanya perbedaan SSE antara simulasi dengan praktek *real* berkaitan dengan komponen-komponen elektronika yang digunakan, terutama Op-Amps. Pada simulasi Op-Amps yang digunakan adalah yang ideal sedangkan pada prakteknya non-ideal. Selain itu kualitas resistor (nilai toleransi resistansi) juga berpengaruh terhadap SSE [15].

Simulasi dilanjutkan dengan mode Proporsional-Integral (PI) dan didapati terdapat SSE walau kecil tetapi dengan *settling time* yang tergantung pada nilai K_i . Semakin besar nilai K_i *settling timenya* semakin cepat. Hasil simulasi tidak terjadi *overshoot*. Begitu juga ketika simulasi dalam mode PID, tidak terdapat *overshoot*. Hal ini juga ditemui saat praktek real, tidak ada *overshoot* karena tidak terjadi osilasi di sekitar *set-point*. Hal serupa didapati untuk mode PID, baik simulasi maupun praktek real. *Overshoot* tidak terjadi karena bagian rangkaian differensial dari sistem PID hanya memproses sinyal feedback saja tanpa membandingkan dengan set point sinyal PV pada U1 ke U4 lalu ke U7 pada Gambar 1.

Hal demikian terjadi karena nilai set point terbagi oleh resistor pada bagian set point itu sendiri, yang bahwa nilai error yang terhitung atau terukur pada keluaran Op-Amp U3 sudah lebih rendah. Jika resistor pembagi tegangan pada bagian input set point ditiadakan akan timbul osilasi dan juga *overshoot*. Oleh karena itu rangkaian seperti pada Gambar 1 lebih layak untuk diterapkan.

Pengujian ke dua dilakukan pada rangkaian PWM (Gambar 4) baik secara simulasi maupun praktek real. Hasil keduanya tidak memperlihatkan selisih yang signifikan. Pengukuran pada praktek real menggunakan oskiloskop mini. Korelasi antara tegangan *output* dari PID dengan *duty cycle* PWM diperlihatkan dalam Tabel 1.

Hal ini menunjukkan bahwa tegangan output PID harus diatur antara 4,7 volt hingga 5,3 volt untuk memperoleh rentang *duty cycle* antara 10% hingga 4% sebagai yang dibutuhkan oleh motor-servo. Pengujian tersebut dilakukan pada frekuensi 50 Hz dengan tegangan *dual supply* pada op amps (+12V dan -12V) dengan pengaturan output PWM sebesar 5 volt.

Tabel 1. Korelasi tegangan output PID dengan *Duty Cycle* PWM.

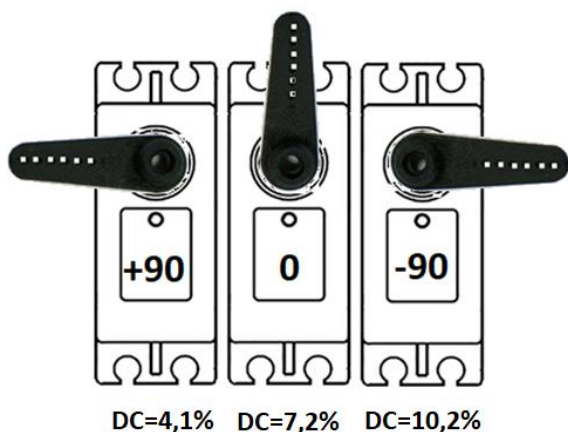
Tegangan output PID (Volt)	Duty Cycle Simulasi (%)	Duty Cycle Real (%)
4,5	12	12,1
4,6	11	11,2
4,7	10	10,4
4,8	9	9,3
5	7	7,1
5,2	5	4,8
5,3	4	4,1
5,5	3	3,2

Pengujian ke tiga dilakukan terhadap motor servo secara *real* dengan menerapkan rangkaian pada Gambar 4 dengan karakteristik sebagaimana pada Tabel 1. Hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Korelasi *Duty Cycle* PWM dengan posisi putaran poros motor servo (tanpa beban).

Uji ke	Duty Cycle (%)	Posisi Poros (°, derajat)
1	10,2	-90
2	9,1	-62
3	7,8	-31
4	7,2	0 (center)
5	6,1	+31
6	4,9	+63
7	4,1	+90

Ilustrasi Posisi putaran poros motor servo berdasarkan *duty cycle* PWM diperlihatkan pada Gambar 10.



Gambar 10. Posisi putaran poros motor servo berdasarkan *duty cycle* PWM.

Pengujian ke empat dilakukan terhadap regulator *power supply* AC (Gambar 6).

Pengujian dilakukan untuk mengetahui hubungan antara posisi poros potensiometer pada unit regulator terhadap tegangan listrik yang dihasilkan. Pengukuran tegangan listrik menggunakan digital AC voltmeter seperti pada Gambar 11 dengan pemanas listrik (*strip heater*) (resistansi = 90Ω dan daya = 600W). Hasilnya ditunjukkan dalam Tabel 3.

Pada posisi poros potensiometer di bawah 135° tegangan output tidak terukur. Dari pengukuran ini terlihat bahwa putaran efektif potensiometer hanyalah 50% saja, yaitu dari 135° sampai 270°. Dengan kata lain posisi poros potensiometer minimum harus pada 135° sebelum diputar oleh motor servo sehingga menyisakan derajat putaran sebesar 270° - 135° = 135°, yang akan menghasilkan tegangan output antara 78V hingga 219V.



Gambar 11. Alat ukur tegangan listrik AC.

Tabel 3. Korelasi derajat putaran poros potensiometer pada regulator daya dengan tegangan output.

Derajat putar poros potensiometer	Tegangan output regulator (V)
135	78
162	115
189	154
216	187
243	219
270	219

Pengujian ke lima dilakukan terhadap rangkaian penguat sinyal termokopel (Gambar 5). Rangkaian tersebut dilengkapi dengan *cold junction compensation* (dioda *zener* 4,2V) untuk menghasilkan tegangan *output* sebesar $(4,2 - 0,085T_c/100)V$, yang kemudian tegangan *output* tersebut dibagi oleh resistor 4k9 dan 100Ω sebagai tegangan pada *cold junction* pada titik dingin referensi [16]. Tegangan sinyal dari termokopel disangga oleh Op-Amps A1 dan kemudian diumpankan ke Op-Amps A2 yang

diatur sehingga tegangan outputnya setara dengan 10mV/°C. Termokopel yang dipakai adalah type-K dengan sensitivitas 41µV/°C.

Pada pengujian ini, temperatur lingkungan sekitar 30°C. Pengkalibrasian rangkaian dilakukan pada temperatur 0°C (es sedang mencair) untuk mendapatkan tegangan output sebesar 0 volt dan air 100°C (air mendidih) untuk mendapatkan tegangan output 1000 mV. Setelah itu air panas dibiarkan mendingin dan dicatat lagi temperatur dan tegangan outputnya. Pengukuran tegangan menggunakan multimeter digital dan pengukuran temperatur menggunakan termometer digital. Untuk temperatur yang lebih tinggi bahan yang dipakai adalah timah solder yang dipanaskan hingga meleleh dan ujung termokopel dicelupkan dalam lelehan dan dibiarkan mendingin pelan-pelan dan dicatat nilai temperatur dan tegangan output rangkaian. Hasil pengujian ini ditunjukkan dalam Tabel 4.

Tabel 4. Korelasi temperatur termokopel terhadap nilai tegangan output rangkaian penguat sinyal.

Temperatur termokopel (°C)	Tegangan output (mV)
0	0,01
30	298
40	412
50	493
60	605
70	706
80	802
90	896
100	1003
120	1221
130	1304
140	1389
150	1513
160	1683
170	1759
180	1822

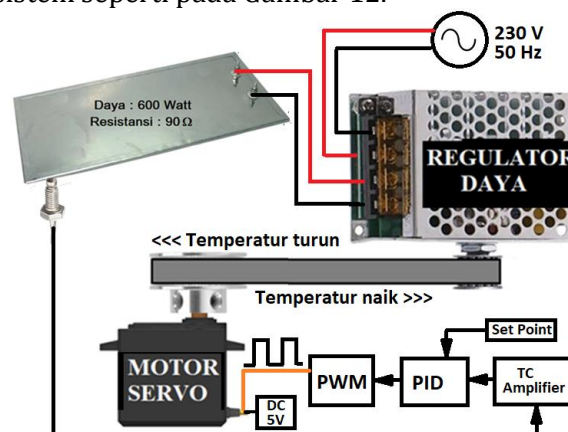
Regresi linier terhadap data pada Tabel 4 menghasilkan persamaan 3:

$$V = 10,258T - 12,398 \quad (3)$$

dengan V adalah tegangan output dari rangkaian penguat sinyal termokopel (mV) dan T adalah temperatur objek (°C). Tegangan output ini kemudian diumpkan ke rangkaian PID sebagai variabel proses (temperatur).

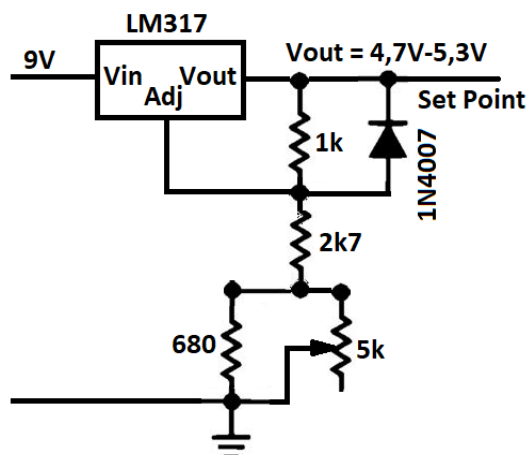
3.1 Kalibrasi dan Pengujian Akhir

Pengujian akhir dilakukan dengan cara merangkai semua sub-sistem menjadi sebuah sistem seperti pada Gambar 12.



Gambar 12. Sketsa sistem pengendalian temperatur PID dengan servo motor sebagai aktuator.

Tegangan *supply* untuk bagian servo motor, PWM, dan TC amplifier adalah 5V, sedangkan untuk bagian PID dual 12V. Pengujian akhir ini dilakukan untuk mengkalibrasi sistem secara keseluruhan dan khususnya untuk mendapatkan hubungan antara potensiometer (VR1) pada bagian set point (U2, Gambar 1) dengan temperatur terukur pada pelelehan timah. Tegangan (set point) harus berkisar antara 4,7V hingga 5,3V yang bersesuaian dengan duty cycle PWM antara 10% hingga 4%. Untuk mencapai nilai tegangan set point ini ternyata tidak bisa dengan menggunakan satu potensiometer (VR1) pada U1 (Gambar 1). Rangkaian set point harus dimodifikasi seperti diperlihatkan pada Gambar 13.



Gambar 13. Rangkaian set point tegangan dengan menggunakan voltage regulator LM317.

Potensiometer 5k digunakan untuk mengatur set point. Pada posisi minimum akan menghasilkan output sekitar 4,7V dan pada posisi maksimum akan menghasilkan tegangan sekitar 5,3V.

Dengan pengujian terakhir ini didapat hubungan antara set point dengan temperatur lelehan timah seperti ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Korelasi tegangan set point, output PID dan temperatur lelehan timah.

Tegangan set point (Volt)	Temperatur Timah (°C)	Keterangan
4,7	118	Tidak meleleh
4,8	130	Tidak meleleh
5	147	Tidak meleleh
5,2	152	Tidak meleleh
5,3	168	Tidak meleleh
5,4	182	Tidak meleleh

4. Kesimpulan

Dari serangkaian percobaan yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa motor servo dapat digunakan sebagai aktuator untuk mengatur temperatur pada proses pemanasan dengan listrik dengan hasil yang baik. Namun demikian masih ada beberapa kekurangan yang ditemui yaitu belum didapatkan *transfer function* secara keseluruhan sistem, dan terutama sekali untuk motor servo.

Ucapan Terima Kasih

Terima-kasih kepada Fakultas Teknik Unila yang telah mendanai penelitian ini melalui DIPA-FT tahun 2024 sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik.

Daftar Pustaka

- [1] Nathan Ehresman, 2020, *Steam vs. Electric Heating - The Basic*, Valin Corp. <https://www.valin.com/resources/article/s/steam-vs-electric-heating-basics>. Diakses tanggal 06 November 2024.
- [2] Wibowo, B. C., Dahlan, M., & Setiawan, R. R., 2023. *Stepper motor control analysis using acceleration-deceleration method based on PLC (programmable logic control)*. Jurnal Media Elektrik, Vol. 21, No. 1, pp. 1-9.
- [3] AKT Automation Technology Co., Ltd., *Advantages and disadvantages of stepper motors*. <https://aktmotor.com/advantages-and-disadvantages-of-stepper-motors/>, diakses tanggal 10 Oktober 2024.
- [4] Nanjing Aubo Electric Co., Ltd; 2020, *What is the difference between stepper motor and servo motor?*, <https://www.vfd-softstarter.com/news/what-is-the-difference-between-stepper-motor-a-33146479.html> , diakses tanggal 10 Oktober 2024.
- [5] Mezher, L. S., 2021. *Characteristics of servo DC motor with PID controller*. Journal of Mechanical Engineering Research and Developments, Vol. 44, No. 2, pp. 392-400.
- [6] Hu, H., Gu, H., Li, C., Cai, X., & Li, J., 2015. *The design of DSP controller based DC servo motor control system*. in *2015 3rd International Conference on Advances in Energy and Environmental Science*: Atlantis Press.
- [7] Abdullah, Z. B., Shneen, S. W., & Dakheel, H. S., 2023. *Simulation model of PID controller for DC servo motor at variable and constant speed by using matlab*. Journal of Robotics and Control (JRC), Vol. 4, No. 1, pp. 54-59.
- [8] Yousef, A., 2011. *Experimental set up verification of servo DC motor position control based on integral sliding mode approach*. JES. Journal of Engineering Sciences, Vol. 39, No. 5, pp. 1095-1110.
- [9] Andrzejewski, A., 2019. *Time-optimal position control of DC motor servo drive*. Przegląd Elektrotechniczny, Vol. 95, No. 12.
- [10] Harshitha, S., Shamanth, S., & Chari, A. K., 2022. *A review of various controller techniques designed for the operational control of dc and servo motors*. in *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 2273, No. 1: IOP Publishing.
- [11] N. Shanmugasundaram, E.N. Ganesh, S.Pradeep Kumar, 2018. *Study and simulation of the current voltage characteristics of 8 Kw PV array simulator*, International Journal of Pure and Applied Mathematics, Volume 118 No. 11 2018, 427-433.
- [12] Analog Devices, 2023. *Modern thermocouples and a high-resolution delta-sigma ADC enable high-precision temperature measurement*, <https://www.analog.com/en/resources/technical-articles/modern-thermocouples-high-resolution-delta-sigma-adc-enable-high-precision-temperature-measurement.html>, diakses tanggal 06 November 2024.

- [13] Rajguru Electronics (I), Pvt. Ltd., *4000W SCR motor controller*, <https://rajguruelectronics.com/Product/7369/4000W%20scr%20motor%20controller.pdf>, diakses tanggal 11 Oktober 2024.
- [14] Tapan Kumar, 2014. *Analog fabrication of PID controller*, Thesis for the degree of Bachelor of Technology in Electrical Engineering, Department of Electrical Engineering National Institute of Technology, Rourkela, India.
- [15] Pramudita, R., Ibrohim, I., Somantri, Y., Rizulloh, M. A., Pawinanto, R. E., & Somantri, M., 2023. *Optimization of electronic control system learning through op-amp trainer implementation*. Circuit: Jurnal Ilmiah Pendidikan Teknik Elektro, Vol. 7, No. 2, pp. 117-131.
- [16] Engineering Prof., <https://youtu.be/-BsDLBI166U>, diakses tanggal 3 Oktober 2024.