

## Sistem Kontrol Suhu dan Debit Air pada Mesin Pencetak Bushing Baterai menggunakan Kontroler PID

Affan Ghafar Syah Putra <sup>1\*</sup>, Lucky Putri Rahayu <sup>2</sup>, Slamet Budiprayitno <sup>3</sup>, Adam Shandy Arsyad<sup>4</sup>

Teknologi Rekayasa Otomasi, Departemen Teknik Elektro Otomasi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia<sup>1\*</sup>

Teknologi Rekayasa Otomasi, Departemen Teknik Elektro Otomasi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia<sup>2\*</sup>

Teknologi Rekayasa Otomasi, Departemen Teknik Elektro Otomasi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia<sup>3\*</sup>

PT GS Battery, Karawang, Indonesia<sup>4</sup>

Email: affanghafarsp@gmail.com <sup>1\*</sup>; lucky.putri@its.ac.id <sup>2\*</sup>; slametbp@its.ac.id <sup>3\*</sup>; adam.arsyad@gs.astra.co.id <sup>4\*</sup>

**Abstract** - The quality of battery bushings is significantly affected by the performance of the molding machine, which faces issues such as temperature instability in the middle mold and water flow instability in the cooling system during disturbances. These issues result in a maximum temperature overshoot of 10.5°C with on-off heater control and water flow instability due to the use of a manual valve. To improve product quality and reduce defects, ongoing research focuses on maintaining temperature stability and consistent water flow in the cooling system. This project applies a PID control system to the middle mold heater using the Ziegler-Nichols tuning method and a PID Modulating Control Valve (MCV) for the cooling system, utilizing system identification and manual tuning in MATLAB. The PID heater control parameters are  $K_p = 4.35$ ,  $K_i = 0.0090625$ , and  $K_d = 522$ , achieving a stable temperature at 40.3°C with a rise time of 1231 seconds, maximum overshoot of 3.8°C, settling time of 1351 seconds, and steady-state error of 1.43%. The PID MCV control simulation results in  $K_p = 5$ ,  $K_i = 0$ ,  $K_d = 0.25$ , stabilizing water flow with a maximum overshoot of 0.04 L/min, settling time of 3 seconds, and a steady-state error of 2%.

**Keyword:** Battery Bushing, Heater, Middle Mold, Modulating Control Valve (MCV), PID Control

### 1. PENDAHULUAN

*Bushing* baterai adalah proses melapisi bagian dalam sel baterai dengan bahan tertentu untuk mencegah terjadinya korosi atau kebocoran, sekaligus meningkatkan kinerja dan umur panjang baterai, sehingga kualitas *bushing* baterai sangat penting diperhatikan mengingat fungsinya yang sangat vital pada baterai. Pada mesin pencetak *bushing* baterai, dilakukan produksi *bushing Automotive Battery* (AMB) mulai dari pelelehan timah, pencetakan *bushing*, hingga dilakukan tes kebocoran atau *Air Leak Tester* (ALT). Proses pencetakan *bushing* terjadi pada bagian *mold* mesin. Pada bagian ini terbagi menjadi tiga antara lain *upper mold*, *middle mold*, dan *bottom mold*. Dari hasil pengujian oleh tim *Quality Control* (QC) di salah satu perusahaan baterai di Indonesia, didapatkan banyak produk yang cacat pada bagian atas yang mana proses pencetakan terjadi pada bagian *middle mold*. Hal ini didukung dengan tingkat *reject bushing* baterai yang lolos pada mesin tinggi, mencapai 19.420 pcs dari total produksi 1.799.009 pcs selama satu tahun. Produk cacat yang terdistribusi ke pelanggan akan menimbulkan dampak yang besar pada perusahaan antara lain merusak citra perusahaan, mengurangi tingkat kepercayaan, bahkan bisa mengurangi keuntungan perusahaan.

Berdasarkan pengamatan dan observasi di

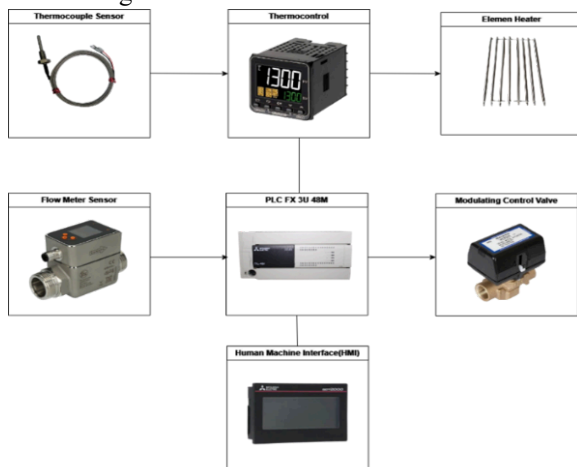
lapangan, akar penyebab masalah yaitu faktor suhu pada *middle mold* [1]. Terdapat beberapa masalah pada bagian ini antara lain suhu yang fluktuatif atau tidak stabil, tidak efektif serta tidak efisiennya alur kontrol kerja mesin, dan debit air sistem pendingin yang tidak stabil ketika terjadi gangguan. Hal ini terjadi karena *heater* yang dikontrol oleh *thermocontrol* menggunakan kontrol *on-off* tidak mampu menstabilkan suhu *middle mold* yang memiliki maksimum *overshoot* mencapai 10,5°C. Pada saat ini, jika suhu *middle mold* melebihi ambang batas (160°C), operator akan menyempatkan angin dari kompresor agar suhu segera turun. Pada sistem pendingin, terjadi ketidakstabilan dikarenakan penggunaan *valve* manual yang tidak dapat menstabilkan debit air ketika terjadi gangguan. Pada mesin ini, sistem pendingin menyala ketika suhu *middle mold* melebihi suhu setpoint dengan menyalakan solenoid *valve*, kemudian digunakan *valve* manual sebagai pengontrol debit air. Penggunaan *valve* manual saat ini diatur oleh operator produksi tanpa adanya acuan ukur bukaan *valve*. Sistem pendingin yang tidak terkendali dapat menyebabkan suhu *middle mold* jauh dibawah suhu setpoint jika *valve* manual dibuka terlalu besar dan suhu *middle mold* akan lama turun untuk mencapai setpoint jika *valve* dibuka terlalu kecil. Melihat hal tersebut, sehingga pada penelitian berfokus untuk mengontrol suhu dan debit air pada mesin pencetak *bushing* baterai menggunakan

metode PID.

## 2. METODOLOGI

### 2.1 Integrasi Sistem

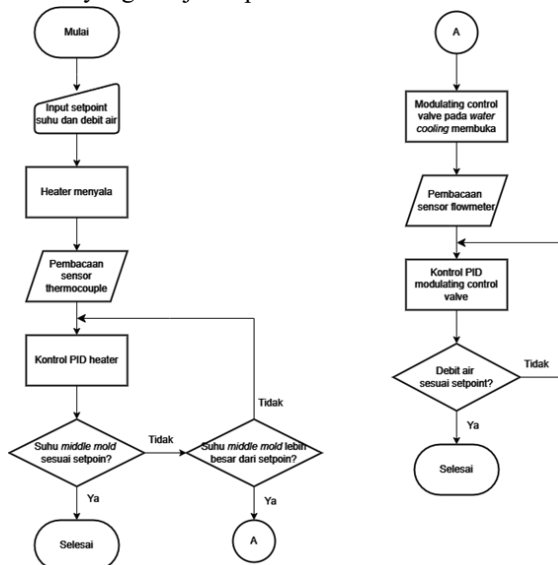
Perancangan integrasi sistem digunakan untuk menggambarkan hubungan keseluruhan sistem dalam pembuatan proyek ini sebagai landasan dalam perancangan sistem selanjutnya. Gambar 1 merupakan integrasi sistem proyek akhir ini yang mana sensor termokopel sebagai *feedback input* suhu, sensor flowmeter sebagai *feedback input* debit air, thermocontrol sebagai kontroler *heater*, PLC FX3U 48M, FX2N-2AD, FX2N-2DA sebagai kontroler *Modulating Control Valve* (MCV) yang terintegrasi dengan thermocontrol, HMI sebagai *interface* dan *input* register ke PLC, dan *heater* serta MCV sebagai aktuator.



Gambar 1 Integrasi Sistem

### 2.2 Perancangan Sequence Sistem

Dalam proyek ini, dilakukan pembuatan flowchart sistem untuk menggambarkan urutan kerja kontrol *Proportional-Integral-Derivative* (PID) *heater* dan MCV pada mesin pencetak *bushing* baterai yang disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2 Flowchart Sequence Sistem

Dalam sistem ini, operator harus memasukkan nilai setpoint suhu pada *thermocontrol* dan setpoint debit air pada HMI. *Heater* akan menyala hingga suhu *middle mold* mencapai suhu setpoint. Nilai daya yang dikeluarkan *heater* akan dikontrol dengan kontrol PID pada thermocontrol dengan *feedback* dari pembacaan sensor termokopel. Kemudian, proses produksi mesin berjalan sehingga *pouring mold* menuangkan timah cair 450°C ke *mold unit*, akibatnya *mold* akan naik sehingga suhu *middle mold* tidak sesuai setpoint dan sistem pendingin akan menyala. Besar kecilnya bukaan MCV akan dikontrol dengan kontroler PID pada PLC dengan nilai *feedback* dari sensor flowmeter.

### 2.3 Perancangan Kontrol PID

Pada penelitian ini mengontrol suhu dan debit air sistem pendingin *middle mold* mesin pencetak *bushing* baterai. Aktuator yang dikontrol yaitu *heater* dan MCV. Perancangan kontrol PID pada proyek ini menggunakan pengujian langsung dikarenakan sistem plant yang sangat kompleks sehingga membutuhkan waktu yang lama dan pemahaman dasar yang kuat terkait perhitungan matematis untuk mendapatkan *transfer function* sistem.

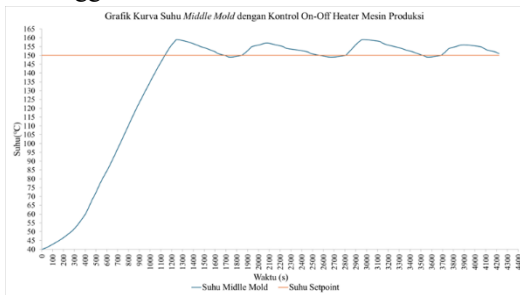
Perancangan kontrol PID pada *heater* dengan melakukan pengujian langsung menggunakan kontrol *on-off*. Pada pengujian ini, didapatkan grafik kurva suhu terhadap satuan waktu sehingga didapatkan karakteristik respons sistem antara lain *delay time* atau waktu tunda (L), *time constant* atau waktu konstan (T), maksimum *overshoot*, *rise time*, dan *steady-state error*. Metode tuning pada pengujian ini menggunakan metode Ziegler-Nichols 1 karena grafik kurva membentuk kurva S dan termasuk sistem *First-Order Plus Dead Time* (FOPDT) [2]. Pada tuning ini, dilakukan penambahan garis tangensial pada titik infleksi sehingga didapatkan waktu tunda dan waktu konstan. Titik infleksi didapatkan dengan mencari gradien terbesar grafik kurva [3].

Perancangan kontrol PID MCV dilakukan pengujian langsung dengan *input* tegangan sehingga didapatkan *output* debit air. Hubungan antara *input* dan *output* dapat diolah menjadi grafik agar diketahui sistem orde sistem. Setelah itu, dilakukan identifikasi sistem menggunakan *software* MATLAB untuk mengetahui *transfer function* sistem. Kemudian, dilakukan analisis terkait *root locus* atau tabel routh (analitik) sistem untuk mengetahui respons step sistem stabil atau dapat menghasilkan osilasi berkelanjutan. Jika respons sistem dapat menghasilkan osilasi berkelanjutan, dapat digunakan metode tuning Ziegler-Nichols 2. Apabila sistem tidak memenuhi syarat metode tuning Ziegler-Nichols 1 dan 2, maka dilakukan tuning manual atau auto-tuning pada *software* MATLAB untuk mendapatkan parameter nilai  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$  [3].

**3.HASIL DAN PEMBAHASAN**

**3.1 Pengujian Heater dengan Kontrol On-Off**

Pada pengujian heater dengan kontrol on-off, mula-mula mesin mati dan suhu middle mold berada pada rata-rata suhu ruangan yaitu 40,3°C. Heater dinyalakan sehingga suhu middle mold akan meningkat seiring bertambahnya waktu dengan referensi suhu pada setpoint yang telah diatur pada thermocontrol yaitu 150°C. Perlunya pengaturan setpoint suhu karena heater yang digunakan memiliki daya yang besar yaitu 1000 W dan jika tidak dilakukan pengaturan setpoint suhu (open loop), maka heater akan terus memanaskan middle mold hingga suhu maksimum heater.



Gambar 3 Grafik Kurva Suhu Middle Mold dengan Kontrol On-Off Heater Mesin Produksi

Dapat dilihat pada Gambar 3, terjadi fluktuasi yang sangat besar antara suhu middle mold dengan suhu setpoint pada penggunaan kontrol on-off heater. Hal ini dipengaruhi juga oleh gangguan penuangan lelehan timah dan menyalnya sistem pendingin pada middle mold. Pada pengujian heater dengan kontrol on-off ini, dilakukan percobaan sebanyak 5 kali dengan hasil sebagai berikut.

Tabel 1 Hasil Pengujian Heater dengan Kontrol On-Off

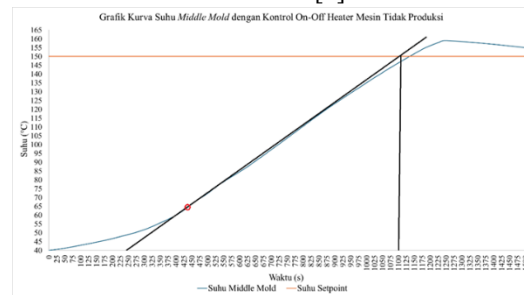
| N o | Suhu Setpoint (°C) | Rise Time (detik) | Maksimum Overshoot (°C) | Settling Time (detik) | Steady-State Error (%) |
|-----|--------------------|-------------------|-------------------------|-----------------------|------------------------|
| 1   | 150                | 1161              | 10,2                    | 1446                  | 3,67                   |
| 2   | 150                | 1154              | 10,4                    | 1428                  | 3,83                   |
| 3   | 150                | 1161              | 10,3                    | 1443                  | 3,77                   |
| 4   | 150                | 1149              | 9,8                     | 1431                  | 3,57                   |
| 5   | 150                | 1164              | 10,5                    | 1438                  | 3,77                   |

Tabel 1 menunjukkan hasil dari pengujian kontrol on-off heater sebanyak 5 kali, didapatkan karakteristik respons yang terburuk pada suhu awal 40,3°C dengan rise time (10%-90%) 1164 detik; maksimum overshoot 10,5°C; settling time 1438 detik; dan steady-state error 3,77%. Rise time pada pengujian ini yaitu dari 10% pada suhu 51,27°C hingga 90% pada suhu 139,03°C.

**3.2 Tuning Kontrol PID Heater dengan Metode Ziegler-Nichols 1**

Dalam pengujian ini, dilakukan tuning kontrol PID heater dengan kontrol PID menggunakan

metode tuning Ziegler-Nichols 1. Jika diketahui transfer function dari sistem, dapat diketahui titik infleksi dari respons step dengan cara diferensial fungsi/turunan kedua dari sistem. Akan tetapi, pada sistem ini belum diketahui transfer function sistem sehingga dilakukan cara lain untuk menentukan titik infleksi. Titik infleksi merupakan titik dimana kurva memiliki gradien terbesar [3]. Waktu tunda (L) didapat dari selisih antara waktu awal terhadap waktu dimana terjadi perpotongan garis tangensial terhadap nilai respons awal (sumbu horizontal). Selanjutnya, waktu konstan (T) merupakan selisih antara L terhadap waktu dimana terjadi perpotongan garis tangensial terhadap suhu setpoint. Dalam penerapannya, waktu tunda dan waktu konstan ditentukan dengan menggambar garis singgung pada titik infleksi kurva berbentuk S dan menentukan perpotongan garis singgung dengan sumbu horizontal dan sumbu vertikal [4].



Gambar 4 Penambahan Garis Tangensial Grafik Kurva Suhu Middle mold Kontrol On-Off Heater Mesin tidak Produksi

Gambar 4 menunjukkan garis tangensial memotong sumbu horizontal pada titik (240, 0), garis bantu vertikal pada titik (1110, 150), dan memotong sumbu horizontal pada titik (1100, 0). Setelah diketahui titik-titik tersebut, dapat diketahui dua konstantanya, yaitu waktu tunda dan waktu konstan. Waktu tunda pada sistem ini yaitu jarak antara titik (0,0) hingga (240,0) sehingga didapatkan nilai waktu tunda yaitu 240 detik. Waktu konstan pada sistem ini yaitu jarak antara titik (240,0) hingga (1110,0) sehingga didapatkan nilai waktu konstan yaitu 870 detik.

Tabel 2 Aturan Ziegler-Nichols 1 Sumber: K. Ogata, 2010

| Type of Controller | $K_p$             | $T_i$           | $T_d$  |
|--------------------|-------------------|-----------------|--------|
| P                  | $\frac{T}{L}$     | $\infty$        | 0      |
| PI                 | $0.9 \frac{T}{L}$ | $\frac{L}{0.3}$ | 0      |
| PID                | $1.2 \frac{T}{L}$ | $2L$            | $0.5L$ |

Berdasarkan aturan Ziegler Nichols 1 dengan menggunakan tipe kontrol PID, didapatkan parameter  $K_p=4,35$ ,  $T_i=480$  detik, dan  $T_d=120$  detik.

$$K_p = 1,2 \frac{T}{L} \tag{1}$$

$$K_p = 4,35$$

$$T_i = 2L \tag{2}$$

$$T_i = 480$$

$$T_d = 0,5L \tag{3}$$

$$T_d = 120$$

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \tag{4}$$

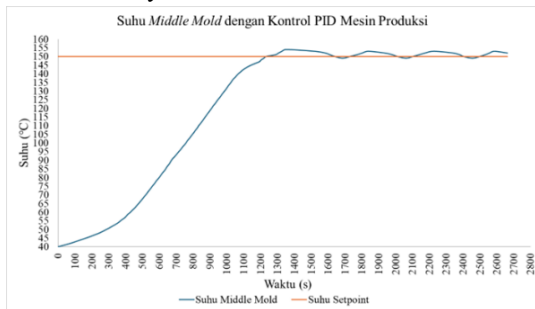
$$K_i = 0,0090625$$

$$K_d = K_p \times T_d \tag{5}$$

$$K_d = 522$$

### 3.3 Pengujian Heater dengan Kontrol PID

Pada pengujian heater dengan kontrol PID, mula-mula mesin mati dan suhu middle mold berada pada rata-rata suhu ruangan yaitu 40,3°C. Dilakukan perubahan parameter dengan metode kontrol yang semula menggunakan kontrol on-off menjadi kontrol PID. Kemudian, dilakukan pengaturan parameter nilai K<sub>p</sub>, T<sub>i</sub>, dan T<sub>d</sub> pada thermocontrol. Heater dinyalakan sehingga suhu middle mold akan meningkat seiring bertambahnya waktu dengan referensi suhu pada setpoint yang telah diatur pada thermocontrol yaitu 150°C.



Gambar 5 Grafik Kurva Suhu Middle mold dengan Kontrol PID Heater Mesin Produksi

Dapat dilihat pada Gambar 5, terjadi fluktuasi antara suhu middle mold dengan suhu setpoint pada penggunaan kontrol on-off heater. Hal ini dipengaruhi oleh gangguan penuangan lelehan timah dan menyalnya sistem pendingin pada middle mold. Pada pengujian heater dengan kontrol on-off ini, dilakukan percobaan sebanyak 5 kali dengan hasil sebagai berikut.

Tabel 3 Hasil Pengujian Kontrol PID Heater

| No | Suhu Setpoint (°C) | Rise Time (detik) | Maksimum Overshoot (°C) | Settling Time (detik) | Steady-State Error (%) |
|----|--------------------|-------------------|-------------------------|-----------------------|------------------------|
| 1  | 150                | 1224              | 4,1                     | 1363                  | 1,57                   |
| 2  | 150                | 1227              | 3,9                     | 1359                  | 1,5                    |

| No | Suhu Setpoint (°C) | Rise Time (detik) | Maksimum Overshoot (°C) | Settling Time (detik) | Steady-State Error (%) |
|----|--------------------|-------------------|-------------------------|-----------------------|------------------------|
| 3  | 150                | 1233              | 4,3                     | 1364                  | 1,63                   |
| 4  | 150                | 1231              | 3,8                     | 1351                  | 1,43                   |
| 5  | 150                | 1221              | 3,9                     | 1349                  | 1,43                   |

Tabel 3 menunjukkan hasil dari pengujian kontrol PID heater sebanyak 5 kali, didapatkan karakteristik respons terbaik pada suhu awal 40,3 dengan rise time (10%-90%) 1231 detik; maksimum overshoot 3,8°C; settling time 1351 detik; dan steady-state error 1,43%. Rise time pada pengujian ini yaitu dari 10% pada suhu 51,27°C hingga 90% pada suhu 139,03°C.

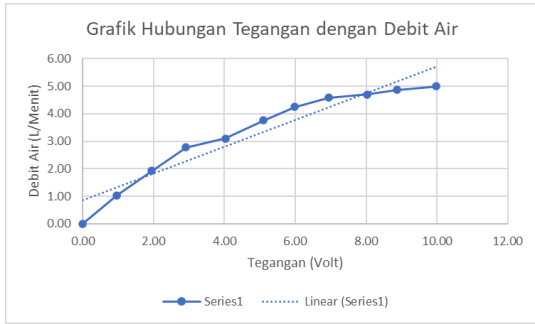
Tabel 4 Perbandingan Karakteristik Respon Suhu Middle mold dengan Kontrol On-Off dan Kontrol PID Heater

| Kontrol Heater Mesin Produksi | Rise Time (detik) | Maksimum Overshoot (°C) | Settling Time (detik) | Steady-State Error (%) |
|-------------------------------|-------------------|-------------------------|-----------------------|------------------------|
| Kontrol On-Off                | 1164              | 10,5                    | 1438                  | 3,77                   |
| Kontrol PID                   | 1231              | 3,8                     | 1351                  | 1,43                   |

Tabel 4 menunjukkan bahwa kontrol on-off heater memiliki rise time lebih cepat dibandingkan dengan kontrol PID heater karena penggunaan kontrol on-off akan memberikan daya maksimal pada heater sampai tercapainya suhu setpoint middle mold tanpa mengurangi daya, berbeda dengan penggunaan kontrol PID yang akan memberikan daya lebih rendah pada heater jika suhu mendekati setpoint. Akan tetapi, penggunaan kontrol PID heater memberikan respons yang lebih baik dengan maksimum overshoot 3,8°C, settling time 1351 detik, dan steady-state error 1,43% daripada penggunaan kontrol on-off heater dengan maksimum overshoot 10,5°C, settling time 1438 detik, dan steady-state error 3,77%.

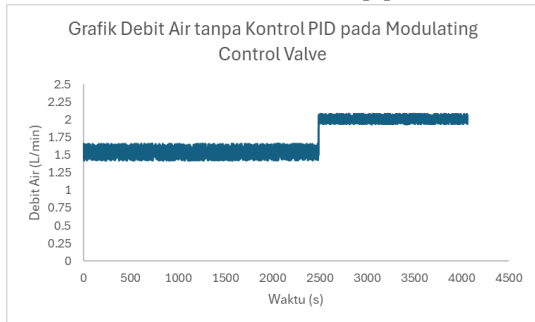
### 3.4 Pengujian Modulating Control Valve tanpa Kontrol PID

Pengujian MCV tanpa kontrol PID dilakukan untuk mendapatkan hubungan antara input dan output debit air yang diatur oleh MCV. PLC FX2N-2DA yang digunakan memiliki nilai digital 12-bit sehingga memiliki data bit 0-4095. Selain itu, nilai analog yang keluar pada PLC FX 2N-2DA memiliki tegangan 0-10Vdc.



Gambar 6 Grafik Hubungan Tegangan dengan Debit Air

Grafik hubungan *input* dan *output* sistem dapat menentukan orde sistem kontrol MCV dengan menggambarkan algoritma nilai mutlak  $c(t)-c(\infty)$  dengan  $c(t)$  sumbu horizontal (debit air) keluaran sistem sebagai fungsi  $t$  [5]. Apabila kurva berbentuk garis lurus, sistem adalah orde pertama [5]. Gambar 6 menunjukkan grafik hubungan tegangan dengan debit air garis yang tidak lurus atau non-linear. Hal ini dapat digunakan untuk menentukan nilai poles dan zero dari sistem kontrol MCV [5].



Gambar 7 Grafik Debit Air tanpa Kontrol PID pada Modulating Control Valve

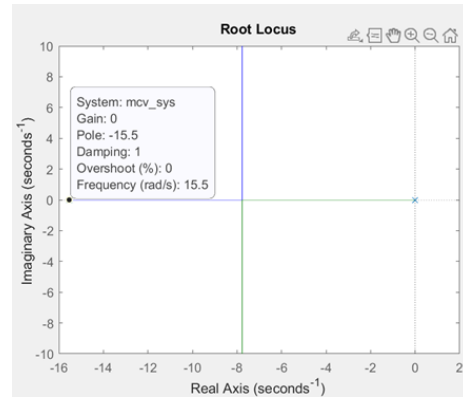
Gambar 7 menunjukkan bahwa debit air yang terbaca ketika tidak adanya gangguan memiliki maksimum *overshoot* sebesar 0,58 L/min. Ketika terjadi gangguan, MCV tidak dapat mengatur debit air yang keluar sesuai setpoint.

### 3.5 Simulasi Kontrol PID *Modulating Control Valve* di MATLAB

Simulasi kontrol MCV tidak bisa menggunakan metode tuning Ziegler-Nichols 1 karena sistem ini tidak memiliki step respons berbentuk kurva S dengan artian bahwa waktu tunda ( $L$ ) tidak ada atau respons sistem sangat cepat [4]. Oleh karena itu, perlunya mengidentifikasi step respon sistem berdasarkan hubungan antara *input* dan *output* yang telah dilakukan pada subbab sebelumnya. Perlunya penggunaan *software* MATLAB untuk menentukan *transfer function* sistem, diagram bode, *root locus*, dan tuning kontrol PID [6].

*Transfer function* sistem didapatkan dengan memasukkan hubungan antara *input* dan *output* MCV pada *system identification* MATLAB, didapatkan *transfer function* sistem sebagai berikut.

$$H(s) = \frac{23.83}{s^2 + 15.54s + 0.0001325} \quad (6)$$



Gambar 8 Root Locus

Jika pole berada pada sebelah kanan sumbu imajiner (Right Half Plane), maka sistem menjadi tidak stabil. Dapat diketahui bahwa metode Ziegler-Nichols 2 dapat digunakan jika respons step sistem dapat beresilasi berkelanjutan dengan hanya memberi *gain*  $K_{cr}$ . *Gain*  $K_{cr}$  dapat diketahui dengan mencari *root locus* dari respons step yang memiliki pole berada pada sumbu imajiner. Dapat dilihat pada Gambar 8, tidak ditemukan kestabilan marginal untuk sistem ini karena pole selalu berada di kiri sumbu imajiner (Left Half Plane) yang menandakan bahwa sistem stabil dan tidak dapat menggunakan metode Ziegler-Nichols 2 [4].

Simulasi kontrol PID dilakukan dengan *software* MATLAB untuk mengetahui pengaruh perubahan parameter terhadap karakteristik respons step sistem sebelum dilakukan pengujian langsung di lapangan. Berikut merupakan hasil simulasi kontrol PID MCV. Dengan catatan bahwa *rise time* dihitung dari 10% pada 0,15 L/min hingga 90% pada 1,35 L/min.

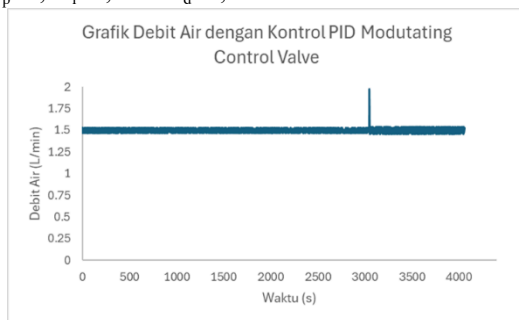
Tabel 5 Perbandingan Karakteristik Respon Sistem dengan Perubahan Parameter Nilai  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$  pada *Software* MATLAB

| Parameter Kontrol PID              | Rise Time (detik) | Settling Time (detik) | Max Overshoot (L/min) | Steady-State Error (%) |
|------------------------------------|-------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|
| $K_p=10$<br>$K_i=0$<br>$K_d=0$     | 0.111             | 1.025                 | 0.237                 | 0                      |
| $K_p=5$<br>$K_i=0$<br>$K_d=0$      | 0.211             | 1.052                 | 0.061                 | 0                      |
| $K_p=5$<br>$K_i=0.1$<br>$K_d=0$    | 0.198             | 1.078                 | 0.066                 | 0.27                   |
| $K_p=5$<br>$K_i=0.1$<br>$K_d=0.25$ | 0.258             | 0.963                 | 0.004                 | 0.27                   |
| $K_p=5$<br>$K_i=0$<br>$K_d=1$      | 0.385             | 3.135                 | 0.002                 | 0                      |
| $K_p=7$<br>$K_i=0$<br>$K_d=0.25$   | 0.17              | 0.676                 | 0.011                 | 0                      |
| $K_p=5$<br>$K_i=0$<br>$K_d=0.25$   | 0.26              | 0.9                   | 0                     | 0                      |

Tabel 5 menunjukkan perbandingan karakteristik respons sistem *rise time*, *settling time*, maksimum *overshoot*, dan *steady-state error* dengan perubahan parameter nilai  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$ . Dari hasil simulasi didapatkan karakteristik respons sistem terbaik dengan nilai  $K_p=5$ ;  $K_i=0$ ; dan  $K_d=0,25$  yaitu *rise time* (10%-90%) 0,26 detik; *settling time* 0,9 detik; tidak ada *overshoot* dan *steady-state error*.

### 3.6 Pengujian Kontrol PID Modulating Control Valve

Pengujian kontrol PID MCV dilakukan dengan menyalakan sistem pendingin *middle mold* selama 4352 detik, *input* setpoint debit air 1,5 L/min, dan dilakukan pada waktu rawan terjadinya gangguan. Kemudian, dilakukan *record* data pada sensor flowmeter untuk mengetahui debit air dengan kontrol PID pada MCV menggunakan parameter  $K_p=5$ ;  $K_i=0$ ; dan  $K_d=0,25$ .



Gambar 9 Grafik Debit Air dengan Kontrol PID pada Modulating Control Valve

Gambar 9 menunjukkan ketika terjadi gangguan pada laju debit air, MCV dapat mengatasi gangguan tersebut dengan mengatur bukaan *valve* hingga debit air yang terbaca pada sensor *flowmeter* sesuai dengan setpoint debit air. Berdasarkan pengujian tersebut, didapatkan karakteristik respons sistem dengan *steady-state error* sebesar 2% dan

*settling time* sebesar 3 detik.

Tabel 6 Perbandingan Karakteristik Respon Debit Air tanpa dan dengan Kontrol PID Modulating Control Valve

| Kontrol MCV                          | Maksimum Overshoot (L/min) | Settling Time (detik) | Steady State Error (%) |
|--------------------------------------|----------------------------|-----------------------|------------------------|
| Tanpa Kontrol PID terdapat Gangguan  | 0,58                       | -                     | -                      |
| Dengan Kontrol PID terdapat Gangguan | 0,04                       | 3                     | 2                      |

Tabel 6 menunjukkan perbandingan debit air MCV tanpa dan dengan kontrol PID saat terjadi gangguan. Debit air dengan MCV tanpa kontrol PID memiliki maksimum *overshoot* 0,58 L/min dan tidak dapat mengatur debit air sesuai *setpoint* jika terjadi gangguan. Berbeda dengan debit air yang menggunakan kontrol PID pada MCV yang memiliki maksimum *overshoot* 0,04 L/min, *settling time* 3 detik, dan *steady-state error* 2% saat terjadi gangguan. Perbedaan hasil kontrol PID MCV pada simulasi *software* MATLAB dan kondisi aktual dikarenakan pengaruh dari panjang pipa sistem pendingin, *elbow* pada sambungan pipa, ketinggian pemasangan pipa yang berkaitan dengan gaya gravitasi, perbedaan ukuran diameter pipa, tidak stabilnya debit air, adanya *valve*, adanya *reducer* serta *nipple*, dan adanya kerak pada pipa sehingga menimbulkan aliran turbulensi yang memengaruhi kestabilan debit air sistem pendingin [7].

### 4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan analisis pengujian penelitian proyek akhir ini dapat disimpulkan bahwa:

1. Parameter nilai PID *heater* dengan metode tuning Ziegler-Nichols 1 didapatkan  $K_p=4,35$ ;  $K_i=0,0090625$ ; dan  $K_d=522$ ; berhasil menstabilkan suhu *middle mold* pada mesin pencetak bushing baterai saat produksi dengan karakteristik respons step terbaik pada suhu awal 40,3°C dengan *rise time* (10% - 90%) 1231 detik; maksimum *overshoot* 3,8°C; *settling time* 1351 detik; dan *steady-state error* 1,43%.
2. Parameter nilai PID Modulating Control Valve (MCV) dengan simulasi pada *software* MATLAB memiliki hasil yang terbaik dengan  $K_p=5$ ;  $K_i=0$ ; dan  $K_d=0,25$  didapatkan karakteristik respons sistem dengan *rise time* (10%-90%) 0,26 detik; *settling time* 0,9 detik; tidak ada *overshoot*; dan tidak ada *error*.
3. Penggunaan kontrol PID MCV yang digunakan dalam pengujian dengan nilai  $K_p=5$ ; nilai  $K_i=0$ ; dan nilai  $K_d=0,25$  sebagai parameter kontrol PID MCV pada sistem pendingin *middle mold* berhasil menstabilkan debit air meskipun terjadi gangguan dan didapatkan karakteristik respons dengan maksimum *overshoot* 0,04 L/min; *steady-state*

*error* 2%; dan *settling time* 3 detik.

Saran yang dapat diberikan sebagai referensi di kemudian hari terkait penelitian proyek akhir ini yaitu:

1. Sebaiknya gunakan pengujian keakurasian sensor dengan tingkat ketelitian pembacaan yang sama dan menggunakan alat pengukuran agar kalibrasi sensor lebih akurat.
2. Perlunya *regoodzone setpoint* debit air pada water cooling system saat *overheat* agar suhu *middle mold* lebih cepat untuk mencapai suhu *setpoint*.
3. Untuk menghindari gangguan saat dilakukan kontrol MCV, pastikan bahwa tidak adanya kebocoran pada pipa *water cooling system* dan perlunya pemilihan ukuran diameter pipa yang tepat karena akan memengaruhi kestabilan debit air akibat aliran turbulensi

## 5. PUSTAKA

- [1] Indd, R.K., (2009). Injection-molding problems in engineering thermoplastics causes and solutions. BASF, North America.
- [2] I. Setiawan, (2008). Kontrol PID untuk proses industri. Elex Media Komputindo, Jakarta.
- [3] Laboratorium Kontrol dan Otomasi, (2024). Training modul MATLAB PID controller. Departemen Teknik Elektro ITS, Surabaya.
- [4] K. Ogata, (2010). Modern control engineering, 5th edn. Pearson, Delhi.
- [5] K. Ogata, (1996). Teknik kontrol otomatis: jilid 1, 2nd edn. Erlangga, Jakarta.
- [6] MathWorks, (2023). Temperature Control in a Heat Exchanger - MATLAB & Simulink Example. [www.mathworks.com](https://www.mathworks.com/help/control/ug/temperature-control-in-a-heat-exchanger.html), viewed 28 July 2024, <<https://www.mathworks.com/help/control/ug/temperature-control-in-a-heat-exchanger.html>>.
- [7] Vennard, J.K., (1961). Elementary fluid mechanics, 4th edn. John Wiley & Sons, Inc., London.