

Penalaan Parameter PID dengan Metode Ziegler-Nichols untuk Optimasi Kontrol Kecepatan Motor pada Alat Spin Coater

Nasrul Hamid¹⁾, Ahyar Mansur²⁾

^{1,2}Perawatan dan Perbaikan Mesin, Akademi Teknik Soroako
nasrul.hamid@gmail.com
ahyaralmansur@gmail.com

Abstrak

Putaran motor yang tinggi dan stabil diperlukan pada alat *spin coater* untuk menghasilkan pelapisan material yang tipis dengan ketebalan seragam. Untuk memperoleh putaran motor yang stabil, maka pengendali *Proportional Integral Derivative* (PID) dibutuhkan untuk mengendalikan kestabilan sistem. Permasalahan utama dalam pengendali PID adalah menentukan konstanta parameter pengendali. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan penalaan parameter PID untuk mendapatkan kombinasi parameter yang optimal untuk mencapai kecepatan putar motor yang tinggi dan stabil pada alat *spin coater* berbasis Arduino. Proses *tuning* atau penalaan secara eksperimental dilakukan dengan aturan Ziegler-Nichols metode kedua untuk memperoleh parameter pengendali. Kombinasi nilai konstanta parameter PID yang diperoleh selanjutnya diaplikasikan dan diujikan ke dalam sistem *spin coater*. Kombinasi parameter pengendali PID yang optimal yang diperoleh yaitu $K_p = 0.0018$, $K_i = 0.0002$, dan $K_d = 0.0045$. Proses optimasi kontrol kecepatan motor membuat sistem mencapai *set point* relatif lebih cepat dibandingkan dengan sebelum optimasi. Sistem setelah dioptimasi mampu meminimalkan galat sebesar 83.51% dari sebelumnya.

Kata Kunci: PID, metode Ziegler-Nichols, parameter pengendali, optimasi, spin coater

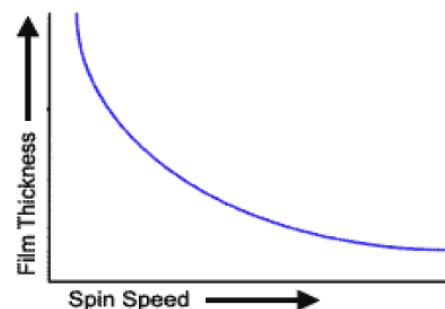
I. PENDAHULUAN

Metode pelapisan *spin coating* merupakan salah satu teknik pelapisan bahan material dengan memanfaatkan gaya sentripetal untuk mendeposisikan lapisan tipis dengan cara menyebarkan larutan ke atas substrat. Substrat diputar dengan kecepatan konstan tertentu agar diperoleh endapan lapisan tipis di atas substrat [1]. Mesin yang digunakan untuk membentuk lapisan tipis ini disebut *spin coater*.

Proses *spin coating* pada dasarnya terdiri atas empat tahapan. Pada tahap pertama cairan atau larutan pelapis diletakkan pada permukaan substrat. Tahap kedua merupakan tahap pemutaran substrat sampai pada kecepatan tertentu yang diinginkan. Pada tahap ketiga, setelah substrat mencapai putaran konstan, larutan akan menyebar ke tepi substrat. Pada tahap terakhir, lapisan yang telah menyebar ke seluruh permukaan substrat akan mengalami penguapan dan pengeringan, dan terbentuk lapisan tipis pada permukaan substrat [2].

Ketebalan lapisan yang dihasilkan tergantung pada kecepatan putaran motor penggerak alat *spin coater*. Untuk membuat lapisan tipis dengan ketebalan seragam diperlukan putaran motor yang tinggi dan konstan. Kecepatan putar merupakan salah satu faktor penting dalam proses *spin coating* karena mempengaruhi gaya sentrifugal yang bekerja pada larutan pelapis. Semakin tinggi kecepatan putar, gaya sentrifugal yang terbentuk semakin mendorong substrat menjauhi poros dan membentuk lapisan yang semakin tipis. Gambar 1

memperlihatkan hubungan ketebalan lapisan dan kecepatan putar [2]. Untuk mendapatkan tingkat lapisan yang diinginkan, kecepatan putar perlu dikendalikan agar konstan pada kecepatan yang sesuai.



Gambar 1. Ketebalan lapisan vs kecepatan putar *spin coater*

Untuk memperoleh putaran motor yang stabil, maka diimplementasikan pengendali *Proportional Integral Derivative* (PID). Pengendali PID telah digunakan secara luas pada sistem kontrol industri terutama pada pengendalian kecepatan motor [3][4]. Pengendali PID diperlukan untuk mengontrol kecepatan motor sesuai kebutuhan untuk memastikan efisiensi yang lebih tinggi dan kinerja yang optimal [4].

Penelitian ini berfokus pada penalaan parameter PID untuk mendapatkan kombinasi parameter yang optimal untuk mencapai kecepatan putar motor yang tinggi dan stabil pada alat *spin coater* berbasis Arduino. Pengendali

PID didesain dengan menggunakan metoda penalaan (*tuning*) Ziegler-Nichols.

II. KAJIAN LITERATUR

A. Pengendali PID

Pengendali PID terdiri atas tiga komponen pengendali utama yaitu *proportional*, *integral*, dan *derivative* yang dapat dipakai secara bersamaan maupun sendiri-sendiri tergantung dari tanggapan atau respon yang diinginkan dari suatu sistem. Pengendali PID ini secara berkesinambungan menghitung galat (*error*) sebagai pembeda antara nilai acuan *setpoint* yang diinginkan [5].

Prinsip dasar skema kontrol PID adalah untuk bertindak pada variabel yang akan dimanipulasi melalui kombinasi yang tepat dari tiga aksi pengendalian. Pengendali proporsional, dimana aksi kendali sebanding dengan sinyal galat, berguna untuk mengurangi galat dan mempercepat respon waktu. Pengendali integral, dimana aksi kendali sebanding dengan integral dari sinyal galat, digunakan untuk menghilangkan galat pada kondisi tunak (*steady state error*). Pengendali derivatif, dimana aksi kendali sebanding dengan turunan dari sinyal galat, digunakan untuk mengurangi *overshoot* dan *settling time* [3][6].

Pengendali PID dinyatakan dalam:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

Variabel yang dikendalikan adalah $u(t)$, dan $e(t)$ adalah galat yang merupakan selisih antara nilai referensi dengan nilai sinyal keluaran, sementara K_p , K_i , dan K_d merupakan koefisien dari bagian proporsional, integral, dan derivatif parameter PID yang harus ditentukan. K_i dapat dinyatakan dengan K_p/T_i dan K_d dapat dinyatakan dengan $K_p T_d$, sehingga persamaan (1) menjadi:

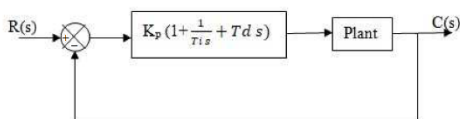
$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2)$$

Keuntungan menggunakan T_i dan T_d adalah mewakili beberapa pengertian fisik yang dapat dimengerti, karena masing-masing mewakili waktu integrasi (*integration time*) dan waktu turunan (*derivative time*).

Dalam domain s , fungsi alih pengendali PID dari persamaan (2) dapat dituliskan sebagai berikut:

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (3)$$

Diagram blok pengendali PID pada sistem berumpan-balik atau sistem closed loop ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Pengendali PID pada sistem *closed loop*

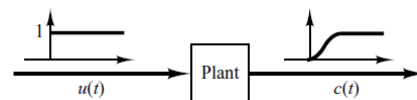
Pada kenyataannya, pengontrolan PID pada sistem dinamik yang tidak diketahui atau yang tidak bisa didefinisikan dengan baik, parameter pengendali harus ditentukan secara eksperimental. Penentuan atau penalaan tersebut dapat dilakukan dengan menggunakan perubahan langkah pada sinyal referensi atau gangguan. Pada dasarnya, penyetelan konstanta K_p , K_i (atau T_i), dan K_d (atau T_d) dilakukan dengan memvariasikan nilai secara skematis hingga diperoleh karakteristik respons yang cukup baik [3].

B. Metode Penalaan Ziegler-Nichols

Banyak metode telah dikembangkan selama bertahun-tahun untuk menjawab permasalahan mengenai bagaimana menyetel pengendali PID. Yang paling terkenal adalah metode Ziegler-Nichols.

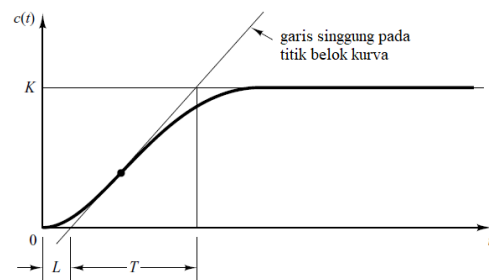
Proses pemilihan parameter pengendali untuk memenuhi spesifikasi kinerja yang ditentukan dikenal sebagai penyetelan atau penalaan pengendali (*controller tuning*). Ziegler dan Nichols mengusulkan aturan untuk menentukan nilai K_p , T_i , dan T_d berdasarkan karakteristik respon transien dari sebuah sistem. Terdapat dua metode dalam aturan penalaan Ziegler-Nichols, yang disebut sebagai metode pertama dan metode kedua [7].

Pada metode pertama, tanggapan atau respon sistem atau *plant* terhadap masukan satu satuan fungsi *step* ditentukan secara eksperimental, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. Jika respon yang dihasilkan melalui eksperimen ataupun dari simulasi dinamik sistem menunjukkan kurva berbentuk S, maka metode ini dapat diterapkan [7][8].



Gambar 3. Respon sistem terhadap masukan fungsi *step*

Kurva berbentuk S pada Gambar 4, dapat dicirikan oleh dua konstanta yaitu waktu tunda L dan konstanta waktu T . Kedua konstanta ini ditentukan berdasarkan garis singgung pada titik belok kurva, perpotongan garis singgung dengan sumbu waktu dan garis $c(t) = K$ menghasilkan konstanta L dan T [7][9].

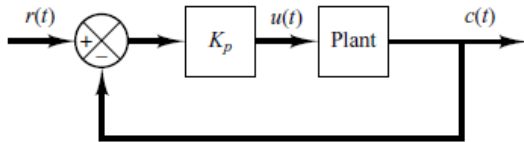


Gambar 4. Respon sistem berbentuk kurva S

Parameter K_p , T_i , dan T_d yang diperoleh dari metode pertama Ziegler-Nichols ditentukan berdasarkan Tabel 1.

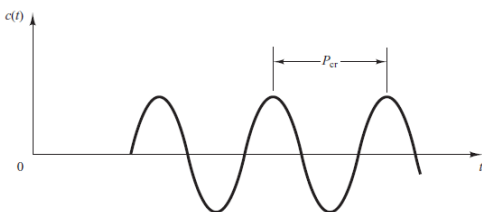
Tabel 1. Aturan Ziegler-Nichols metode pertama

Pengendali	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$



Gambar 5. Sistem *closed-loop* dengan pengendali proporsional

Pada metode kedua Ziegler-Nichols, mula-mula diatur $T_i = \infty$ dan $T_d = 0$, sehingga sistem hanya bekerja dengan pengendali proporsional seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5. Nilai K_p ditingkatkan dari 0 ke nilai kritis K_{cr} sehingga diperoleh keluaran yang mulai berosilasi dengan amplitudo yang konstan secara terus menerus. Nilai penguat kritis K_{cr} dan periode P_{cr} yang bersesuaian ditentukan secara eksperimental seperti yang diperlihatkan pada Gambar 6. Tabel 2 menunjukkan rumusan yang diajukan Ziegler-Nichols untuk digunakan dalam menentukan parameter K_p , T_i , dan T_d .



Gambar 6. Periode P_{cr} dari osilasi keluaran sistem

Tabel 2. Aturan Ziegler-Nichols metode kedua

Pengendali	K_p	T_i	T_d
P	$0.5K_{cr}$	∞	0
PI	$0.45K_{cr}$	$\frac{1}{1.2}P_{cr}$	0
PID	$0.6K_{cr}$	$0.5P_{cr}$	$0.125P_{cr}$

Metode penalaan Ziegler-Nichols bertujuan untuk mencapai maksimum overshoot 25% terhadap masukan step [7]. Nilai parameter K_p , T_i , dan T_d berdasarkan pada respon step sistem atau *plant* secara eksperimental atau berdasarkan nilai K_p yang dihasilkan dalam kestabilan marginal bila hanya aksi kendali proporsional yang digunakan.

III. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dibagi ke dalam tiga tahapan sebagai berikut:

1. Tahap pra-eksperimen

Sistem dikondisikan untuk merekam variabel pengamatan yang dibutuhkan ke dalam *log file*, yakni kecepatan motor yang terbaca sensor (rpm), kecepatan yang diharapkan (rpm), dan durasi waktu (millisecond).

Setiap baris log diambil secara *real time* selama 30 detik pada tiga segmentasi kecepatan target yakni 5 000 rpm, 10 000 rpm, dan 15 000 rpm. Data *real time* diproses dengan menghitung nilai rata-rata putaran motor (rpm) tiap detik, untuk memudahkan pengamatan.

2. Tahap optimasi

Optimasi dilakukan dengan menerapkan pengendali PID pada sistem *spin coater* berbasis mikrokontroler. Parameter PID ditetapkan sesuai persamaan (2). Kombinasi K_p , K_i (atau T_i), dan K_d (atau T_d) diperoleh dengan menggunakan metode kedua Ziegler-Nichols, sesuai dengan Tabel 2.

Nilai galat merupakan selisih nilai referensi yang diinginkan (*set point*) terhadap nilai rpm yang terbaca oleh sensor.

$$e(t) = S_p - P_v(t) \quad (4)$$

S_p adalah set point, sedangkan $P_v(t)$ adalah nilai yang terbaca oleh sensor setiap waktu t . Sensor yang digunakan untuk mengukur rpm motor pada alat *spin coater* adalah tachometer digital.

3. Tahap pengujian

Pada tahap ini kombinasi konstanta PID yang diperoleh pada tahap optimasi, diterapkan pada sistem. Kemudian *log file* kembali direkam dengan mengambil fitur pengamatan yang sama seperti pada tahap pra eksperimen. Galat rata-rata (\bar{e}) digunakan untuk mengukur nilai rasio optimasi.

$$\bar{e} = \frac{\sum_{i=0}^t |sp - rpm_i|}{t} \quad (5)$$

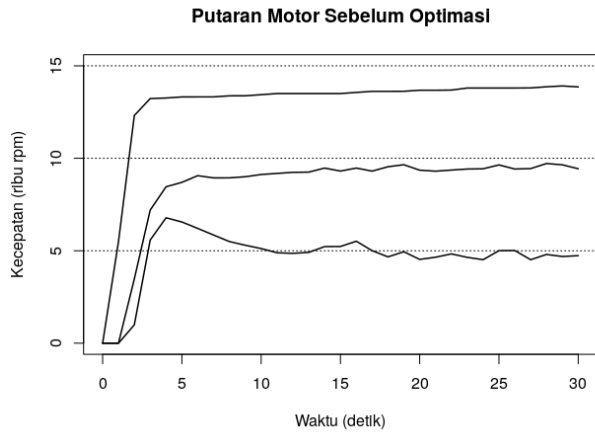
Dengan sp adalah nilai *set point*, rpm_i adalah putaran aktual pada detik ke- i , dan t adalah durasi putaran (detik).

Penelitian ini menggunakan beberapa perangkat keras maupun perangkat lunak antara lain:

1. *Spin coater* berbasis Arduino dengan penggerak motor *bushless DC*.
2. Kabel USB sesuai tipe mikrokontroler.
3. Software pendukung diantaranya Arduino IDE dan Rstudio.
4. Tachometer digital untuk validasi akurasi pembacaan sensor.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari tahap pra-eksperimen, diperoleh kecepatan putaran seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7. Sistem dapat mencapai kecepatan 5000 rpm dan 10 ribu rpm dengan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kondisi stabil masing-masing adalah 10 detik dan 5 detik. Sistem tidak dapat mencapai kecepatan 15000 rpm dalam rentang waktu 30 detik, meskipun masih terlihat kecenderungan peningkatan kecepatan.



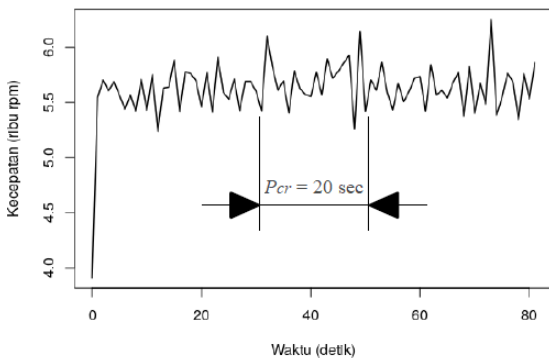
Gambar 7. Putaran motor pra optimasi

Sistem dioptimasi dengan menerapkan pengendali PID pada modul mikrokontroler. Algoritma pengendali PID adalah sebagai berikut:

```

1  throttle = getInitPoint()
2  sp = getSetPoint()
3  while (sp != 0){
4  //Hitung galat
5  e = sp - currentRPM
6  timer = now
7  t = timer - prevTimer
8  // Hitung komponen PID
9  P = Kp * e
10 I = I + Ki * e
11 D = Kd * (e - prevError) / t
12 PID = P + I + D
13 // kirim sinyal ke motor
14 Signal.out(throttle + PID)
15 // Update prevValue
16 prevError = e
17 prevTimer = timer
18 }
    
```

Kombinasi konstanta PID dicari dengan melakukan proses penalaan nilai K_p untuk mendapatkan nilai K_{cr} saat sistem mulai beresilasi. Dari proses *tuning* atau penalaan diperoleh $K_{cr} = 0.003$.



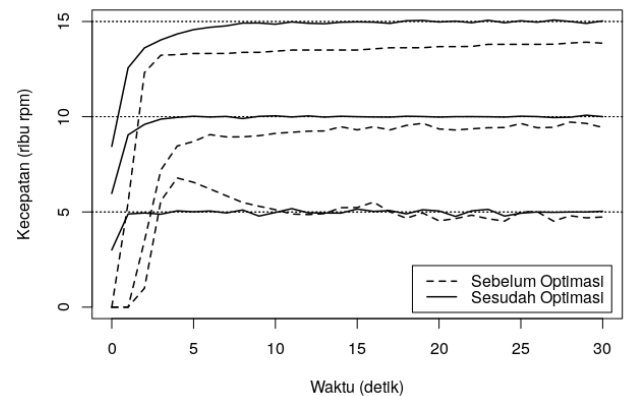
Gambar 8. Periode osilasi kecepatan motor

Dengan menggunakan $K_{cr} = 0.003$, diperoleh grafik seperti pada Gambar 8 dengan perkiraan $P_{cr} = 20$ detik.

Nilai ini dimasukkan dalam formula Ziegler-Nichols seperti pada Tabel 2, dan diperoleh kombinasi konstanta parameter PID sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 K_p &= 0.6K_{cr} \\
 &= 0.6 \cdot 0.003 = 0.0018 \\
 K_i &= \frac{K_p}{T_i} = \frac{1.2K_{cr}}{P_{cr}} \\
 &= \frac{1.2 \cdot 0.003}{20} = 0.0002 \\
 K_d &= K_p T_d = 0.075K_{cr} \cdot P_{cr} \\
 &= 0.075 \cdot 0.003 \cdot 20 = 0.0045
 \end{aligned}$$

Kombinasi nilai konstanta parameter PID yang diperoleh selanjutnya diaplikasikan dan diujikan ke dalam sistem *spin coater*. Hasil yang diperoleh ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Perbandingan kecepatan motor sebelum dan sesudah optimasi

Dari grafik di atas terlihat bahwa setelah optimasi, *set point* relatif lebih cepat dicapai dibandingkan dengan sebelum optimasi. *Settling time* (T_s) untuk kriteria 5% ditentukan berdasarkan konstanta waktu atau *time constant* (τ) yaitu $T_s = 3\tau$. *Time constant* merupakan waktu yang diperlukan untuk mencapai 63% dari nilai akhir. Berdasarkan data hasil optimasi diperoleh hasil seperti pada Tabel 3 berikut ini.

Tabel 3. *Settling time* hasil optimasi

Set point (rpm)	63% nilai akhir	Time constant (detik)	Settling time (detik)
5000	3150	2	6
10000	6300	2	6
15000	9450	3	9

Besar optimasi dapat dilihat dari perbandingan galat yang diperoleh sebelum dan sesudah optimasi.

Tabel 4. Perbandingan galat rata-rata

Set point (rpm)	Pra-optimasi (rpm)	Optimasi (rpm)	Selisih (%)
5000	643.60	123.71	80.78
10000	1196.67	143.81	87.98
15000	1801.07	328.42	81.77
Rerata	1213.78	198.65	83.51

Perbandingan galat atau *error* rata-rata sebelum dan setelah optimasi diperlihatkan pada Tabel 4. Pada sistem setelah dilakukan optimasi, mampu meminimalkan galat sebesar 83.51% dari kondisi sebelumnya.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian dan perbandingan data sebelum dan setelah optimasi, dapat disimpulkan bahwa:

1. Dengan metode Ziegler-Nichols diperoleh kombinasi parameter PID yang optimal yaitu $K_p = 0.0018$, $K_i = 0.0002$, dan $K_d = 0.0045$.
2. Optimasi kontrol kecepatan motor membuat sistem mencapai *set point* relatif lebih cepat, dan meminimalkan galat sebesar 83.51% dari sebelumnya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Sofyan rekan mahasiswa Ilmu Komputer Institut Pertanian Bogor (IPB) 2016 dan Laboratorium Fisika Material dan Elektronika Departemen Fisika FMIPA IPB yang telah berkenan memberikan izin mengambil data alat *spin coater*. Terima kasih pula kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LPPM) dan Laboratorium Komputer Akademi Teknik Soroako yang berkenan mengarahkan tulisan ini dapat diselesaikan.

REFERENSI

- [1] S. Sa'id Atsaury, H. Izzatul Islam, N. Nabilah, D. Handy Saputra, G. Nughny Pradipta, A. Kurniawan, H. Syafutra, A. Arif, Irzaman, "Pembuatan Alat *Spin Coater* Berkecepatan Sudut Tinggi Berbasis Arduino Uno", Prosiding Seminar Nasional Fisika SNF 2016, vol. 5, 2016, hal. 137–141.
- [2] M. Meftahul Ferdous, M.M. Rashid, M. Ataur Rahman, "Design and Fabrication of a Simple Cost Effective Spin Coater for Deposition of Thin Film", AENSI Jurnal : Advances in Environmental Biology, vol. 8, no.3, 2014, pp. 729 – 733.
- [3] K. Ogata, "Discrete-Time Control Systems", 2nd ed., New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1995, pp. 115–121.
- [4] V. Vijay Patel, "Ziegler-Nichols Tuning Method, Understanding the PID Controller", in RESONANCE, vol. 25, no. 10, 2020, pp. 1385–1397.
- [5] R. Fajar Anugrah, I. Diah P. K., B. Yan Dewantara, "Kontrol Motor Brushless DC Menggunakan Six Step Comutation dengan Kontrol PID", Jurnal Teknik Elektro dan Komputer TRIAC, vol. 7, no. 2, 2020.
- [6] H. Wibawa, O. Wahyunggoro, A. Imam Cahyadi, "DC Motor Speed Control Using Hybrid PID-Fuzzy with ITAE Polynomial Initiation", IJITEE, vol. 3, no. 1, 2019, pp. 7–15.
- [7] K. Ogata, "Modern Control Engineering", 5th ed., Prentice-Hall, Inc., 2010, pp. 568–577.
- [8] B. Sampurno, A. Abdurrahman, H. Sufyan Hadi, Sistem Kendali PID pada Pengendali Suhu untuk Kestabilan Proses Pemanasan Minuman Sari Jagung", Seminar Nasional Instrumentasi, Kontrol dan Otomasi (SNIKO), Bandung, 2015.
- [9] K. Johan Astrom, "Control System Design", 2002, pp. 216–251.