

RANCANG BANGUN SISTEM KENDALI PID UNTUK INTENSITAS CAHAYA LAMPU DC MENGGUNAKAN MIKROKONTROLER ARDUINO UNO

Nendya Ertika Tanza dan Sumariyah

Departemen Fisika, Fakultas Sains dan Matematika, Universitas Diponegoro, Semarang

E-mail: nendya.ertika@gmail.com

ABSTRACT

The design of PID (Proportional Integral Derivatives) control system has performed for DC light intensity using an Arduino Uno microcontroller. This research aims to create a DC light intensity control system automatically using Arduino Uno, test the design light intensity control system using PID control and test the stability response of the light intensity control system before and after being given interference in the form of obstructions and external light. The method used in this research is Ziegler-Nichols 1 method to obtain the PID constant. The BH1750 sensor is converted to a digital signal by the BH1750 converter and transmitted to the Arduino Uno microcontroller chip via the I2C interface. The PID constant resulting from the Ziegler-Nichol method approach is used for the experimental approach to manual tuning and determining the cycle of Pulse Width Modulation (PWM). The results of this research obtained 82,42% system accuracy and PID constant, is $K_P = 0,1$; $K_I = 2,0$ and $K_D = 0,00000102$. The built-in lamp light intensity control system is able to stabilize due to interference in an average time of 1 second at 400 lx setpoint.

Keywords : BH1750, DC lights, microcontroler, PID, PWM

ABSTRAK

Telah dilakukan rancang bangun sistem kendali PID (Proporsional Integral Derivatif) untuk intensitas cahaya lampu DC menggunakan mikrokontroler Arduino Uno. Penelitian ini bertujuan untuk menciptakan sistem kendali intensitas cahaya lampu DC secara otomatis menggunakan Arduino Uno, menguji sistem pengendali intensitas cahaya hasil rancang bangun menggunakan kendali PID dan menguji tanggapan kestabilan sistem kendali intensitas cahaya sebelum dan sesudah diberi gangguan berupa penghalang dan cahaya eksternal. Metode yang digunakan pada penelitian ini yaitu metode Ziegler-Nichols 1 untuk mendapatkan konstanta PID. Sensor BH1750 dikonversi ke sinyal digital oleh converter BH1750 dan ditransmisikan ke chip mikrokontroler Arduino Uno melalui antarmuka I2C. Konstanta PID hasil pendekatan metode Ziegler-Nichol digunakan untuk pendekatan eksperimen manual tuning dan menentukan siklus dari Pulse Width Modulation (PWM). Hasil penelitian ini diperoleh akurasi sistem 82,42% dan konstanta PID yaitu $K_P = 0,1$; $K_I = 2,0$ dan $K_D = 0,00000102$. Sistem pengendali intensitas cahaya lampu hasil rancang bangun mampu kembali stabil akibat gangguan dalam waktu rata-rata 1 detik pada setpoint 400 lx.

Kata Kunci: BH1750, lampu DC, mikrokontroler, PID, PWM

PENDAHULUAN

Sistem kendali memiliki peranan penting di dalam ilmu pengetahuan dan teknologi. Berdasarkan pengelompokan secara umum sistem kendali terbagi menjadi dua yaitu pengendalian secara manual dan pengendalian secara otomatis. Pengendalian secara manual merupakan pengendalian oleh manusia yang bertindak sebagai *operator*, sedangkan pengendalian secara otomatis dikendalikan oleh alat-alat yang telah *disetting* sehingga berjalan otomatis namun biasanya masih bekerja dibawah pengawasan manusia [1].

Menurunnya kinerja manusia dan produktivitas tumbuhan yang membutuhkan cahaya khusus salah satunya disebabkan oleh pencahayaan yang tidak optimal [2]. Kondisi tersebut dapat diminimalisir menggunakan kendali intensitas cahaya secara otomatis sesuai kebutuhan.

Sumber cahaya terbagi menjadi sumber cahaya alami dan buatan. Sumber cahaya alami seperti cahaya matahari, bulan dan bintang memiliki tingkat intensitas cahaya yang berbeda-beda. Namun demikian sumber cahaya alami tidak dapat bersinar dalam waktu 24 jam. Oleh karena itu manusia memerlukan cahaya tambahan berupa cahaya buatan agar tetap dapat beraktivitas [2]. Salah satu cahaya buatan berupa lampu listrik. Lampu tersebut dapat dikendalikan oleh manusia sesuai kebutuhan melalui sistem kendali [3].

Metode kendali PID (*Proportional Integral Derivative*) merupakan jenis sistem *loop* tertutup yang memiliki karakteristik adanya *feedback* untuk menentukan presisi sistem instrumentasi. PID yang tersusun dari ketiga aksi kendali, yaitu *Proportional (P)*, *Integral (I)* dan *Derivatif (D)* dapat menghasilkan tanggapan yang mempunyai tingkat kestabilan tinggi, mempercepat reaksi sistem seperti menghilangkan *offset* dan memperkecil *overshoot* sesuai *setpoint* dengan cara mengatur setiap parameter *P*, *I*, *D* agar sesuai dengan sinyal masukan yang diinginkan atau *plan* [4].

Peningkatan kinerja sistem pengendali intensitas cahaya lampu DC dapat dilakukan menggunakan kendali PID dengan dukungan dari mikrokontroler khususnya Arduino Uno. Arduino Uno merupakan sebuah *board* mikrokontroler yang didasarkan pada Atmega328 dan banyak digunakan oleh peneliti karena dapat digunakan untuk membangun sistem elektronika dari yang sederhana hingga kompleks secara, cepat dan handal [5].

Beberapa penelitian tentang pengendalian intensitas cahaya lampu menggunakan sensor LDR (*Light Dependent Resistor*) telah dilakukan sebelumnya oleh Turesna dkk (2015) [6], Saputra (2015) [7] dan Mahesta (2015) [8] menunjukkan bahwa LDR yang digunakan sebagai sensor intensitas cahaya memiliki kualitas yang kurang baik karena karakteristik tegangan yang dihasilkan tidak linear.

Pada penelitian ini dilakukan rancang bangun sistem pengendali intensitas cahaya lampu DC berbasis metode kendali PID dan mikrokontroler Arduino Uno menggunakan sensor BH1750 dengan resolusi 16-bit ADC (*Analog to Digital Converter*) yang memiliki karakteristik lebih presisi dan linear. Gangguan penghalang dan cahaya eksternal diberikan untuk menguji kinerja dan kehandalan sistem agar dapat diaplikasikan pada tanaman yang membutuhkan intensitas cahaya khusus dan optimalisasi pencahayaan pada inkubator.

DASAR TEORI

Kontrol Proses

Sistem kendali merupakan suatu pengukuran nilai variabel yang dikontrol dan menerapkan variabel manipulasi pada sistem untuk membatasi penyimpangan nilai yang dikontrol dari nilai yang dikehendaki. Kontroler berfungsi sebagai pengendali suatu proses agar dapat

berlangsung sesuai dengan keadaan yang diinginkan baik secara manual maupun otomatis. Elemen-elemen sistem pengendalian otomatis terdiri dari kontroler, *final control element*, *plant*, *feedback* dan *range* [4].

Karakteristik sistem pengontrolan dibagi menjadi dua jenis sistem, yaitu sistem kontrol *loop* terbuka dan tertutup. Sistem kontrol *loop* terbuka merupakan suatu sistem yang keluarannya tidak diumpan balik ke masukan. Sistem kontrol *loop* tertutup atau yang disebut sebagai sistem kontrol umpan balik digunakan untuk meminimalisir sinyal kesalahan yang diperoleh dari perbedaan antara sinyal masukan dan sinyal umpan balik demi mempertahankan sinyal keluaran sistem pada nilai yang dikehendaki [4].

Intensitas Cahaya

Intensitas cahaya (*cd*) didefinisikan sebagai banyaknya fluks cahaya yang memancar per steradian sudut ruang. Sedangkan kuat penerangan atau iluminasi (*lux*) didefinisikan sebagai banyaknya fluks cahaya yang mengenai satu satuan luas permukaan yang terkena cahaya [9].

Sensor Intensitas Cahaya BH1750

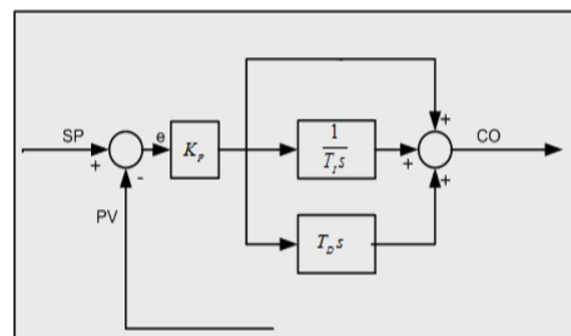
Modul BH1750 merupakan modul sensor cahaya digital GY-302 dengan menggunakan antarmuka I2C yang sensitif terhadap intensitas cahaya di sekitarnya. Modul ini menggunakan sensor fotodiode dan dilengkapi dengan 16 bit ADC *built-in* yang dapat memberikan *output* sinyal digital yaitu nilai intensitas cahaya tanpa melalui perhitungan yang rumit. IC ini paling cocok untuk mendapatkan data cahaya sekitar yang mampu mendeteksi jangkauan luas pada resolusi tinggi (1 - 65535 lx).

Kendali PID

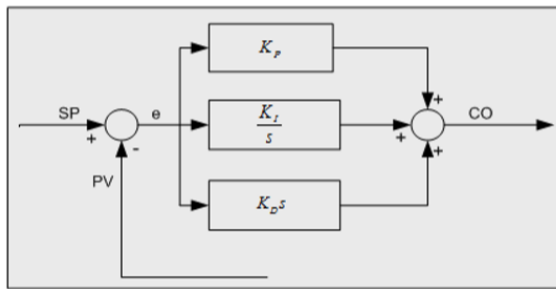
Sistem kendali dapat dikelompokkan menjadi dua jenis berupa sistem kendali *on/off* dan sistem kendali otomatis. Pada sistem kendali otomatis mempunyai tiga aksi pengendalian diantaranya pengendali Proporsional (P), pengendali Integral (I), dan pengendali *Derivatif* (D). Aksi kontrol PID merupakan gabungan dari kontrol P, I dan D yang bertujuan untuk menggabungkan kelebihan masing-masing komponen dasar PID:

1. Kontrol Proporsional : berfungsi untuk mempercepat respon
2. Kontrol Integral : berfungsi untuk menghilangkan *error steady*
3. Kontrol *Derivative* : berfungsi untuk memperbaiki sekaligus mempercepat respon transien.

PID ideal dibedakan menjadi PID bentuk *dependent* (Gambar 1) dan *independent* (Gambar 2). Bentuk *dependent* tidak bergantung terhadap nilai konstanta proposional (K_p), sedangkan bentuk *independent* tergantung terhadap nilai K_p . Jadi ketika melakukan perubahan pada K_p tidak berpengaruh terhadap konstanta parameter lain.



Gambar 1. Diagram blok kontrol PID ideal bentuk *dependent* [4]

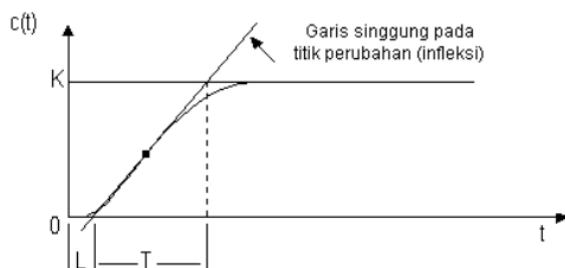


Gambar 2. Diagram blok kontrol PID ideal bentuk *independent* [4]

Keluaran pengontrol PID merupakan penjumlahan dari keluaran pengontrol proporsional, integral dan derivatif [1].

Metode Ziegler Nichol

Metode Ziegler Nichol merupakan metode pendekatan eksperimen yang terbagi menjadi metode osilasi dan kurva reaksi. Metode kurva reaksi didasarkan terhadap reaksi sistem *loop* terbuka. *Plan* sebagai *loop* terbuka dikenai sinyal *step function*. Jika *plan* tidak mengandung unsur integrator ataupun *pole-pole* kompleks, reaksi sistem akan berbentuk seperti Gambar 3.



Gambar 3. Kurva respon bentuk S [4]

Kurva berbentuk S mempunyai dua konstanta, yaitu *dead time* L dan waktu tunda T. *Dead time* adalah waktu yang diperlukan selama kurva reaksi berubah naik. Waktu tunda menggambarkan perubahan kurva setelah mencapai 66% dari keadaan tetapnya [1]. Parameter PID dapat dihitung berdasarkan persamaan pada Tabel 1.

Tabel 1. Penalaan parameter pid dengan metode kurva reaksi

Type Kontroler	Kp	Ti	Td
P	T/L	~	0
PI	0,9 T/L	L/0,3	0
PID	1,2 T/L	2L	0,5L

Mikrokontroler Arduino Uno

Mikrokontroler Arduino Uno merupakan modul yang menggunakan board mikrokontroler 8 bit berbasis Atmega328 yang dapat dijalankan menggunakan *software open source* seperti Windows, LINUX dan Mac OS [5]. Pada penggunaannya dengan cara menghubungkan kabel USB ke komputer atau mensuplainya dengan *adaptor* AC ke DC atau menggunakan baterai untuk memulainya. Atmega328 pada Arduino Uno memiliki sebuah *bootloader* yang memungkinkan kita untuk meng-*upload* kode baru tanpa menggunakan pemrograman *hardware* eksternal [10].

Arduino menggunakan bahasa pemrograman berbasis *wiring* dan *software processing* yang merupakan penggabungan dari bahasa C++ dan Java. Bahasa pemrograman tersebut dapat ditulis melalui *software IDE (Integrated Development Environmet)* Arduino yang terbagi dari bagian *editor program, compiler* dan *uploader* [10].

PWM (Pulse Width Modulation)

Pulse Width Modulation (PWM) merupakan suatu cara proses pengaturan atau manipulasi lebar sinyal secara digital yang dinyatakan dengan pulsa-pulsa dalam suatu periode untuk waktu *on* dan *off*. PWM dapat diaplikasikan untuk mengatur tegangan dengan cara dikonversi menjadi sinyal kotak bolak balik, saat *on* mendekati

tegangan puncak (1) dan saat *off* menjadi nol (0) volt [11].

Cara kerja dan pengendalian PWM dipengaruhi oleh resolusi yang dimiliki oleh PWM itu sendiri. PWM 8 bit memiliki 256 variasi mulai dari 0-255 yang mewakili keluaran dari *duty cycle* 0-100%. Sinyal PWM secara umum memiliki amplitudo dan frekuensi dasar yang tetap, namun memiliki lebar pulsa yang bervariasi. Lebar pulsa sebanding dengan amplitudo yang belum termodulasi, sehingga sinyal PWM memiliki frekuensi gelombang tetap dan *duty cycle* (siklus) bervariasi antara 0-100% [6].

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dalam tiga tahap, yaitu kalibrasi sensor BH1750, pengambilan data *input* dan *output*, dan pengambilan data parameter PID

Kalibrasi Sensor BH1750

Pengujian Sensor BH1750 terhadap alat ukur pembanding (*Lightmeter*) dilakukan dengan cara meletakkan *Lightmeter* sejajar dengan sensor BH1750 untuk mendapatkan data kalibrasi yang terukur. Pada pengujian ini diberikan *input* berupa pancaran cahaya dari lampu melalui nilai PWM, dan *output* yang dihasilkan berupa nilai pembacaan sensor dalam satuan lux. Data yang didapat dari sensor BH1750 dan *Lightmeter* dapat diperoleh persamaan linear sensor sehingga persentase *error* sensor terhadap alat ukur standar dapat dihitung untuk mendukung kerja sistem.

Pengambilan Data Input-Output

Pengambilan data *input* dan *output* dilakukan melalui uji *Driver* CMM6N yang dilakukan secara tertutup, yaitu sistem berada dalam keadaan gelap dan tidak mendapat pengaruh cahaya eksternal untuk mengetahui maksimal

kemampuan sistem dalam bekerja dan untuk mendapatkan data *input* (PWM) dan *output* (tegangan dan intensitas cahaya) pada sistem. Data yang diperoleh menghasilkan persamaan *linear* antara nilai PWM dan intensitas cahaya. Persamaan tersebut digunakan untuk mengendalikan semua variabel yang terdapat dalam sistem pengendali intensitas cahaya lampu berbasis PID.

Pengambilan Data Parameter PID

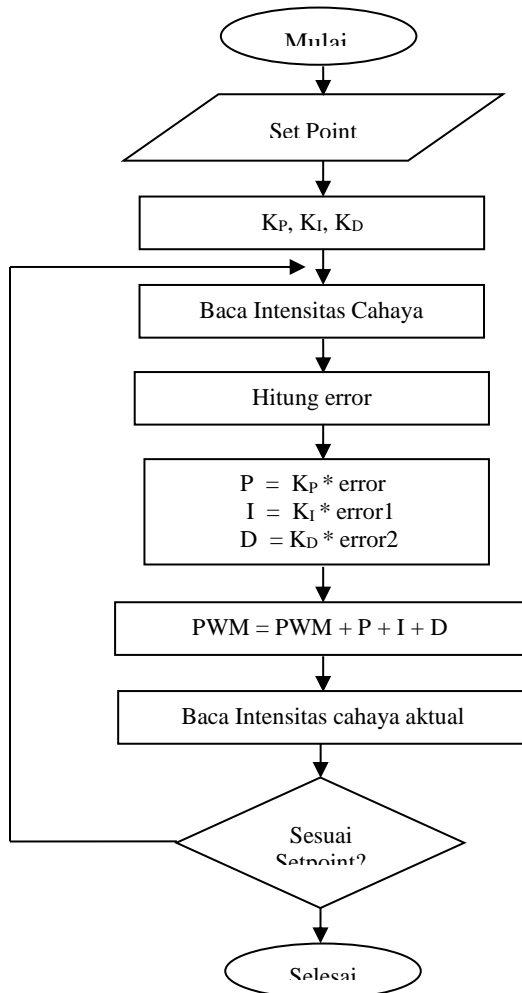
Pengambilan data ini menggunakan IC opt101 untuk mengetahui *respon time* fotodiode dalam menanggapi sistem dari keadaan awal alat ON hingga menuju keadaan stabil berdasarkan *set point*. Pengujian ini diberikan perubahan *input* berupa besaran cahaya yang berasal dari lampu sistem, kemudian menghasilkan *output* grafik S yang menunjukkan hubungan tegangan dan frekuensi pada layar osiloskop. Sehingga didapatkan data waktu tunda (L) dan keadaan *steady* (T) untuk menentukan parameter-parameter PID sebagai pendekatan eksperimen *trial and error*.

Cara kerja sistem

Cara kerja sistem kendali PID untuk intensitas cahaya lampu DC menggunakan mikrokontroler Arduino Uno dapat dijelaskan melalui diagram alir yang ditunjukkan pada Gambar 4.

Berdasarkan *flowchart* pada Gambar 4 diawali dengan memberikan *Set Point* (SP) melalui nilai PWM (*Pulse Width Modulation*) yang dikendalikan oleh potensio, kemudian memberikan nilai konstanta *P* (K_P), konstanta *I* (K_I), konstanta *D* (K_D) melalui *trial and error*. Nilai PWM yang diatur melalui potensio digunakan untuk menyalakan lampu DC sehingga intensitas yang terpancar dapat terbaca oleh sensor BH1750 secara digital

dalam satuan lux. Selanjutnya perhitungan nilai *error* untuk masing-masing konstanta PID didapatkan dengan cara menghitung selisih *SP* dengan nilai pembacaan sensor BH1750.



Gambar 4. Diagram alir sistem kendali PID untuk intensitas cahaya lampu DC

Nilai *error* digunakan untuk menentukan suku P, I, dan D yang akan digunakan untuk menggerakkan *PWM* secara otomatis. Nilai *PWM* yang dihasilkan merupakan penjumlahan dari *PWM* awal dengan keluaran *PID*. Lampu DC menyala sesuai *PWM* yang dikendalikan oleh *PID*, kemudian diterima oleh sensor BH1750 dan hasil pengukuran intensitas cahaya sebagai *Present Value (PV)* terbaca. Nilai *PV* kemudian dibandingkan dengan *SP*. Jika nilai intensitas cahaya lampu

hasil kendali *PID (PV)* sesuai dengan *set point* maka sistem stabil, sebaliknya akan terus melakukan *looping* untuk menghitung *error* hingga tercapai kestabilan pada sistem.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Rancang Bangun

Rancang bangun sistem pengendali intensitas cahaya lampu memiliki dimensi 24,5 cm x 12 cm x 24 cm seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Hasil rancang bangun sistem kendali tampak dalam

Sistem ini memiliki batas dimensi ruang pengukuran (bagian atas) yaitu 24,5 cm x 12 cm x 15 cm dengan jarak sejajar antara sensor dan lampu 10 cm. Lampu yang digunakan memiliki daya 10 Watt dengan tegangan input 12 VDC.

Hasil Kalibrasi Sensor BH1750

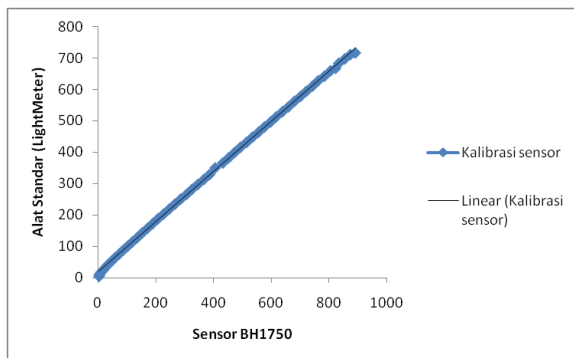
Tabel 2 merupakan data kalibrasi dari sensor cahaya BH1750 terhadap alat ukur standar yang didapat dari rata-rata 3 kali perulangan pengukuran dalam waktu dan rentang *PWM* yang sama sehingga besar kesalahan relatif sensor rata-rata 17,58%

dan grafik kalibrasi sensor cahaya . pada Gambar 6. Hasil pencocokan kurva seperti terlihat pada persamaan (1).

$$y = 0,801x + 16,61 \quad (1)$$

Tabel 2. Hasil kalibrasi sensor

No	PWM	Rata-rata		
		BH1750 (lux)	Lightmeter (lux)	Kesalahan relatif (%)
1	0	4	5	13,33
2	5	5	8	40,00
3	10	7	13	46,15
4	15	12	19	35,71
5	20	19	25	23,68
6	25	27	34	20,59
7	30	37	44	15,91
8	35	48	54	9,94



Gambar 6. Plot kalibrasi sensor intensitas cahaya

Pada pengujian sistem ini menunjukkan bahwa lampu dan sensor memiliki pengukuran terbatas untuk nilai intensitas cahaya antara 4-892 lux dalam keadaan rancang bangun sistem terbuka atau terkena cahaya eksternal.

Hasil Uji Driver CMM6N

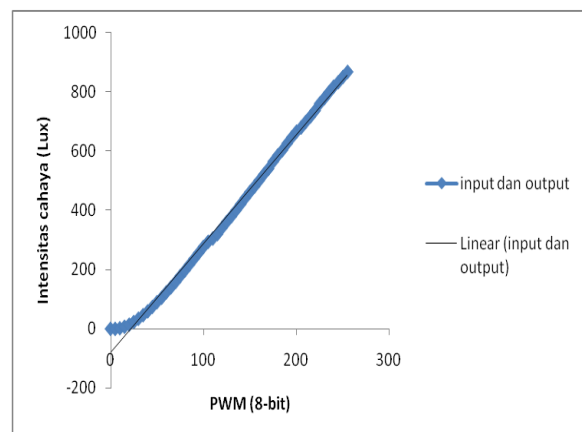
Pada uji *driver* diperoleh data yang dapat menghasilkan persamaan *linear* hubungan antara nilai PWM dan Intensitas cahaya lampu DC untuk mengatur *setpoint*. Data hasil uji ditampilkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil uji *driver* CMM6N

No	Input	Output	
	PWM	Tegangan (Volt)	Intensitas (Lux)
1	0	0,29	0
2	5	0,58	0
3	10	0,86	2
4	15	1,14	7
5	20	1,41	14
6	25	1,68	23
7	30	1,94	34
8	35	2,21	46
9	40	2,47	59
10	45	2,72	74
11	50	2,97	90

Berdasarkan Tabel 3 terlihat jika lebar pulsa *PWM* yang diberikan semakin besar maka intensitas cahaya yang dihasilkan juga semakin besar. Hal ini menunjukkan bahwa *output* berkorelasi secara *input* sehingga didapat persamaan (2) dan grafik pada Gambar 7.

$$y = 3,661x - 77,53 \quad (2)$$

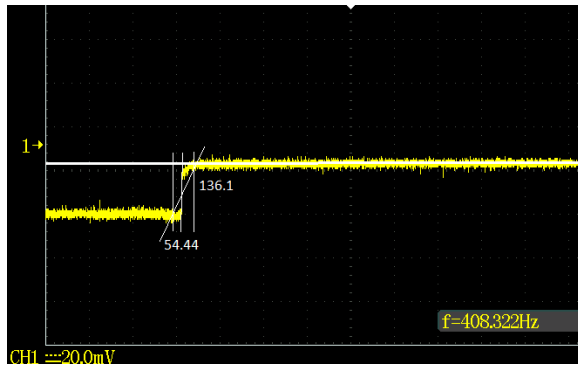


Gambar 7. Hubungan input dan output.

Pada pengujian ini menunjukkan bahwa lampu dan sensor memiliki pengukuran terbatas yaitu untuk nilai intensitas cahaya antara 0-868 lux dalam keadaan rancang bangun sistem tertutup, gelap dan tidak terkena cahaya luar.

Hasil Desain PID

Desain *respon time* menggunakan metode Ziegler Nichols-1 ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Desain respon metode ZN-1.

Berdasarkan respon yang ditunjukkan pada Gambar 8 didapat nilai $L = 0,018$ detik dan $T = 0,012$ detik. Sehingga parameter K_P , K_I dan K_D dapat dihitung melalui persamaan yang ditunjukkan pada Tabel 4. Hasil respon dari metode ZN-1 ditunjukkan pada Gambar 9.

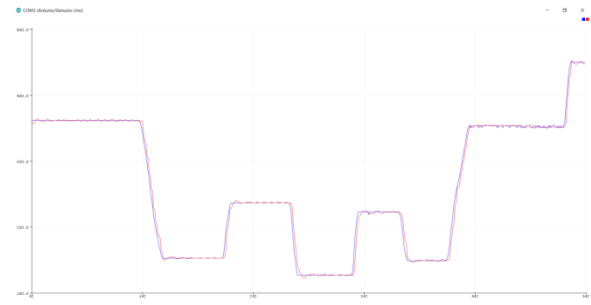
Tabel 4. Hasil perhitungan K_P , K_I dan K_D

K_P	T_I	T_D	K_I	K_D
$1.2 \times \frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$	$\frac{K_P}{T_I}$	$K_P \times T_D$
0.8	0.036	0.009	2.22	0.0072



Gambar 9. Grafik Intensitas sebagai fungsi waktu yang merupakan respon hasil metode ZN-1.

Respon dari Gambar 9 menunjukkan bahwa osilasi yang terjadi cukup besar, maka untuk memperbaiki respon dari hasil tuning Ziegler Nichols diperlukan cara *trial and error* sehingga didapat nilai baru $K_P = 0,1$; $K_I = 2,0$ dan $K_D = 0,00000102$ serta menghasilkan respon seperti Gambar 10.

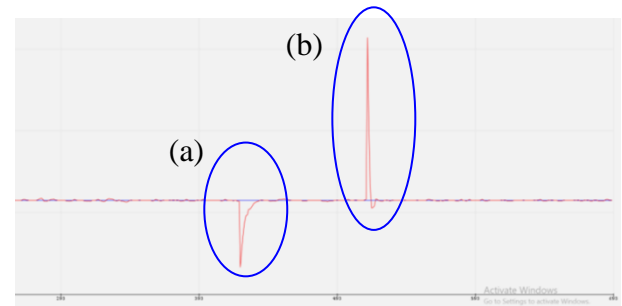


Gambar 10. Grafik Intensitas fungsi waktu yang merupakan respon hasil manual tuning.

Respon setelah menggunakan parameter dari hasil manual tuning terlihat lebih *smooth* dan osilasi teredam. Terlihat bahwa PV selalu mengikuti *setpoint*. Hal ini disebabkan oleh hasil perhitungan kendali PID yang dapat menggerakkan PWM sesuai dengan *setpoint* dan akan tetap mempertahankan keadaan stabilnya.

Uji Gangguan

Gangguan berupa penghalang (Gambar 11.a) dan cahaya eksternal (Gambar 11.b) diberikan kepada sistem untuk menguji kehandalan kestabilan sistem.



Gambar 11. Uji gangguan : (a) Penghalang (b) Cahaya Eksternal

Lingkar biru pada Gambar 11 menunjukkan *offset* dan *overshoot* sesaat ketika diberi gangguan dan mampu kembali pada keadaan stabil dalam waktu rata-rata 1 detik. Sistem mampu kembali pada keadaan stabil dengan cepat ketika diberikan penghalang berupa mika biru dalam rentang 21 lx – 479 lx, sedangkan ketika diberikan cahaya eksternal mampu kembali stabil lebih cepat dalam rentang 344 lx – 856 lx.

KESIMPULAN

1. Sistem kendali PID untuk intensitas cahaya lampu DC berhasil dibangun dengan dimensi ruang pengukuran 24,5 cm x 12 cm x 15 cm dan jarak antara sensor dengan lampu 10 cm. Batas kemampuan pembacaan sensor terhadap sistem yaitu 0 - 868 lux dengan akurasi 82,42%.
2. Hasil uji kestabilan sistem, konstanta PID dari perhitungan metode Ziegler Nichols-1 dan tuning manual adalah $K_P = 0,1$; $K_I = 2,0$ dan $K_D = 0,00000102$.
3. Respon sistem sebelum diberi gangguan mampu berada pada keadaan stabil pada range 4-892 lux. Respon sistem setelah diberi gangguan penghalang dan cahaya eksternal mampu kembali pada keadaan stabil dalam waktu rata-rata 1 detik dengan batas ideal *setpoint* 400 lx.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua dosen dan laborat Departemen Fisika Fakultas Sains dan Matematika yang telah meluangkan waktu, tenaga dan ilmunya untuk memberi masukan sehingga penelitian ini dapat terselesaikan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Setiawan I. *Kontrol PID untuk proses industri*. Surabaya: PT. Elex Media Komputindo; 2008.
- [2]. Latifah NL. *Fisika bangunan 2*. Jakarta: Griya Kreasi; 2015.
- [3]. Karlen M dan Benya JR. *Dasar-dasar desain pencahayaan*. Translated by D. Rumagit. Jakarta: Erlangga; 2007.
- [4]. Arindya R. *Instrumentasi dan kontrol proses*. Yogyakarta: Graha Ilmu; 2014.
- [5]. Budiharto W. *Aneka proyek mikrokontroler (panduan utama untuk riset/tugas akhir)*. Yogyakarta: Graha Ilmu; 2011.
- [6]. Turesna G, Zulkarnain, Hermawan. Pengendali intensitas lampu ruangan berbasis Arduino UNO menggunakan metode fuzzy logic. *J Auto Ctrl Inst*. 2015;7(2):73-88.
- [7]. Saputra FD. Pengaturan kuat cahaya pada solatube menggunakan kontroler PID berbasis mikrokontroler. *Jurnal Skripsi*. 2016;1-8.
- [8]. Mahesta CJS. Sistem pengendali intensitas cahaya pada tanaman anggrek menggunakan kontroler PID berbasis Mikrokontroler Mega 2560. *Jurnal Skripsi*. 2015;1-6.
- [9]. Soedjojo P. *Azas-azas ilmu fisika jilid 3 optika*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press; 1992.
- [10]. Kadir A. *Panduan praktis mempelajari aplikasi mikrokontroler dan pemrogramannya menggunakan Arduino*. Yogyakarta: ANDI; 2013.
- [11]. Rudito P. *Pengaturan PWM (pulse width modulation) dengan PLC*. Malang: Universitas Brawijaya; 2012.