

ANALISIS SISTEM KONTROL INTENSITAS CAHAYA MENGUNAKAN METODE *STATE SPACE*

SKRIPSI

Diajukan kepada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Negeri Yogyakarta
Untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan
Guna Memperoleh Gelar Sarjana Sains



Disusun oleh :

IKHSAN NUR FAUZAN

NIM. 15306141044

**PROGRAM STUDI FISIKA
JURUSAN PENDIDIKAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS NEGERI YOGYAKARTA
2019**

LEMBAR PERSETUJUAN

Tugas Akhir Skripsi dengan Judul

ANALISIS SISTEM KONTROL INTENSITAS CAHAYA MENGUNAKAN METODE *STATE SPACE*

Disusun oleh:

Ikhsan Nur Fauzan
NIM 15306141044

Telah memenuhi syarat dan disetujui oleh Dosen Pembimbing untuk dilaksanakan
Ujian Akhir Tugas Akhir Skripsi bagi yang bersangkutan

Yogyakarta, 25-6-2019

Mengetahui,
Ketua Program Studi

Nur Kadarisman, M.Si.
NIP. 19640205 199101 1 001

Disetujui,
Dosen Pembimbing

Agus Purwanto, M.Sc
NIP. 19650813 199512 1 001

HALAMAN PENGESAHAN

Tugas Akhir Skripsi dengan Judul

ANALISIS SISTEM KONTROL INTENSITAS CAHAYA MENGUNAKAN METODE *STATE SPACE*

Disusun oleh:

Ikhsan Nur Fauzan
NIM 15306141044

Telah dipertahankan didepan Tim Penguji Tugas Akhir Skripsi Program Studi
Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri
Yogyakarta dan dinyatakan lulus pada tanggal 5 Juli 2019

DEWAN PENGUJI

Nama	Jabatan	Tanda Tangan	Tanggal
Agus Purwanto, M.Sc NIP. 19650813 199512 1 001	Ketua Penguji		08-07-2019
Sumarna, M.Si, M.Eng NIP. 19610308 199101 1 001	Penguji I		08-07-2019
Dr. Kuncoro Asih Nugroho, M.Sc NIP. 19770615 200212 1 003	Penguji II		08-07-2019

Yogyakarta, 11/7/19
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Negeri Yogyakarta
Dekan,

Dr. Hartono, M.Si
NIP. 19620329 198702 1 002

PERNYATAAN

Yang bertandatangan di bawah ini

Nama : Ikhsan Nur Fauzan
NIM : 15306141044
Program Studi : Fisika
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Judul Skripsi : Analisis Sistem Kontrol Intensitas Cahaya Menggunakan Metode *State Space*

Menyatakan bahwa karya ilmiah ini adalah hasil pekerjaan saya sendiri dan sepanjang saya tidak berisi materi yang dipublikasikan atau ditulis oleh orang lain atau telah digunakan sebagai persyaratan penyelesaian studi di Perguruan Tinggi kecuali pada bagian-bagian tertentu yang saya ambil sebagai acuan. Apabila ternyata terbukti pernyataan ini tidak benar, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan.

Yogyakarta, 23 Juni 2019

Yang menyatakan



Ikhsan Nur Fauzan

NIM. 15306141044

MOTTO

“Ngelmu iku kalakone kanthi laku”

PERSEMBAHAN

Karya ini saya persembahkan untuk :

1. Kedua orang tua saya, Bapak Joko Wijiyono dan Ibu Soniyem yang selalu memberi uang saku dan telah membayar UKT, nasehat dan motivasi tak lupa juga selalu disampaikan untuk tidak pernah berhenti mencari ilmu.
2. Adik-adikku (Fitri Nur Muktiana dan Akbar Nur Wicaksana) tanpa kalian hidupku tak ada warna.
3. Keluarga besarku dari bapak maupun ibu yang telah memberikan doa terbaik kepadaku.
4. Pak Agus Purwanto sebagai dosen pembimbing sekaligus dosen yang membuat saya dapat melihat fisika sebagai salah satu jalan mengagumi ciptaan-Nya.
5. Teman kelas Fisika E 2015 yang menjadi keluarga baru, jaga silaturahmiya.
6. Teman-teman kelompok KKN 116, terima kasih pengalamannya.
7. Dan siapapun yang pernah memberi saya ilmu, pengalaman, semangat dan doa, semoga memberi manfaat bagi kita semua.

ANALISIS SISTEM KONTROL INTENSITAS CAHAYA MENGUNAKAN METODE *STATE SPACE*

Oleh

Ikhsan Nur Fauzan

15306141044

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk: 1) membuat lampu baca berbasis LED yang dapat dikontrol intensitas cahayanya sesuai dengan *set-point*, dan 2) menganalisis sistem kontrol intensitas cahaya menggunakan metode *state space*.

Penelitian ini dimulai dengan menentukan sensor dan aktuator yang akan digunakan. Sensor yang dipakai berupa LDR yang berbahan CdS dan memiliki sifat resistif. LDR memiliki respon terbaik pada warna cahaya hijau kekuningan (pada panjang gelombang 520 nm) yang hampir sama dengan mata manusia (kuning kehijauan dengan panjang gelombang sekitar 500-600 nm). LED dengan daya maksimum 3 watt digunakan sebagai aktuator karena mudah diatur, lebih hemat energi, dan juga umur pakai yang lebih lama. Sistem kontrol *closed-loop* direalisasikan menggunakan penguat selisih dimana salah satu *input* berasal dari tegangan *set-point* dan *input* yang lain berasal dari *feedback*. Ketika *feedback* digunakan pada op-amp *gain closed-loop* ditentukan oleh rasio impedansi *input* dan impedansi *feedback*. Nilai *set-point* berupa tegangan DC 4 volt. Nilai *set-point* akan dibandingkan dengan tegangan keluaran dari rangkaian pembagi tegangan sensor LDR. Hasil perbandingan tersebut akan dikuatkan sesuai dengan rasio impedansi *input* dan impedansi *feedback*.

Penelitian yang dilakukan menghasilkan alat kontrol yang mampu mengontrol intensitas cahaya pada area tempat baca menggunakan lampu LED 3 watt berwarna *warm-white*. Analisis yang dilakukan menghasilkan nilai matriks state (A) = **2940**, matriks masukan (B) = $89,376 \times 10^6 - 11760 R_{LDR}(t)$ dan input ($u(t)$) yang bekerja pada sistem $\frac{1}{R_{LDR}(t)}$.

Kata Kunci: Sistem kontrol, intensitas cahaya, *state space*, LDR

ANALYSIS OF LIGHT INTENSITY CONTROL SYSTEM USING STATE SPACE METHOD

By:

Ikhsan Nur Fauzan

15306141044

ABSTRACT

This study aimed to: 1) make LED-based reading lights that can control the light intensity according to the set-point, and 2) analyze the light intensity control system using the state space method.

This research was begun by determining the sensor and actuator used. The sensor used was LDR made from CdS and had resistive properties. The LDR had the best response in yellowish-green light color (at a wavelength of 520 nm) which was almost similar to the human eye (greenish-yellow with a wavelength of about 500-600 nm). LED with a maximum power of 3 watts was used as an actuator because it was easy to set up, more energy-efficient, and also had a longer lifetime. Closed-loop control system was realized using the difference amplifier where one of the inputs derived from the voltage set-point and the other input came from feedback. When feedback was used in op-amp, closed-loop gain was determined by the ratio of input impedance and feedback impedance. The set-point value was a 4 volt DC voltage. The set-point value would be compared with the output voltage of the LDR sensor voltage divider circuit. The comparison results would be amplified according to the ratio of input impedance and feedback impedance.

The research resulted in a control device that was able to control the intensity of light in the reading area using a 3-watt warm-white LED light. The analysis carried out produced a matrix state (\mathbf{A})= **2940**, input matrix (\mathbf{B}) = **$89,376 \times 10^6 - 11760R_{LDR}(t)$** and input ($\mathbf{u}(t)$) on system was $\frac{1}{R_{LDR}(t)}$.

Keywords: Control system, light intensity, state space, LDR

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis haturkan atas nikmat yang senantiasa Allah SWT berikan sehingga penelitian yang berjudul “ANALISIS SISTEM KONTROL INTENSITAS CAHAYA MENGGUNAKAN METODE *STATE SPACE*” dapat diselesaikan dengan baik.

Penelitian dan penyusunan Skripsi ini tidak dapat terlaksana dengan baik tanpa adanya dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada :

1. Bapak Dr. Hartono, selaku Dekan Fakultas MIPA Universitas Negeri Yogyakarta yang telah memberikan izin atas penyusunan skripsi ini.
2. Bapak Drs. Yusman Wiyatmo, M.Si. selaku Ketua Jurusan Pendidikan Fisika FMIPA UNY yang telah memberikan kesempatan untuk melaksanakan kegiatan penelitian ini.
3. Bapak Drs. Nur Kadarisman, M.Si. selaku Ketua Prodi Fisika FMIPA UNY yang telah memberikan izin atas penyusunan skripsi ini.
4. Bapak Agus Purwanto, M.Sc. selaku dosen pembimbing sekaligus Penasehat Akademik yang telah memberikan bimbingan dalam penyusunan skripsi ini serta selalu memberikan arahan dan motivasi.
5. Dosen-dosen Jurusan Pendidikan Fisika, FMIPA UNY yang telah memberikan banyak ilmu kepada penulis.
6. Teman-teman FISIKA E 2015 yang banyak memberikan pengalaman dan motivasi.

7. Semua pihak yang telah membantu penulis yang tidak dapat penulis sebutkan persatu.

Penulis menyadari dalam penyusunan naskah skripsi ini masih banyak kekurangan. Oleh karena itu, penulis sangat mengharap saran dan kritik yang bersifat membangun dari semua pihak untuk penyempurnaan lebih lanjut.

Semoga naskah skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi penulis pada khususnya dan dapat menambah wawasan pembaca pada umumnya.

Yogyakarta, 23 Juni 2019

Yang menyatakan



Ikhsan Nur Fauzan

NIM. 15306141044

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PERSETUJUAN	Error! Bookmark not defined.
HALAMAN PENGESAHAN	Error! Bookmark not defined.
MOTTO	v
PERSEMBAHAN	vi
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xvi

BAB IPENDAHULUAN.....	1
A. Latar Belakang.....	1
B. Identifikasi Masalah	4
C. Batasan Masalah	4
D. Rumusan Masalah	5
E. Tujuan Penelitian.....	5
F. Manfaat Penelitian.....	5

BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	7
A. Cahaya	7
1. Satuan Fisika untuk cahaya	8
a. Kuat cahaya atau Candela (I)	8
b. Arus Cahaya atau Lumen (Φ)	8
c. Kuat Penerangan atau Lux (E)	8
2. Sensor Cahaya.....	9
3. LED (<i>Light Emitting Diodes</i>)	12
B. Penguat Selisih	14
C. Sistem kontrol.....	15

D. <i>State-space</i>	18
BAB III METODE PENELITIAN	23
A. Waktu dan Tempat Penelitian	23
1. Waktu Penelitian	23
2. Tempat Penelitian	23
B. Variabel Penelitian	23
C. Alat dan Bahan Penelitian	24
D. Teknik Pengambilan Data	25
1. Tahap Rancang Bangun Alat	25
a. Perancangan Desain Alat	25
b. Perancangan Rangkaian Sistem Kontrol	26
2. Tahap Pengujian Alat	27
a. Pengujian Sensor LDR	28
b. Menguji Rangkaian Sistem Kontrol	29
3. Tahap Pengambilan Data	30
E. Teknik Analisis Data	31
6. Diagram alir tahapan penelitian	32
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	33
A. Karakteristik LDR	33
B. Analisis Rancang Bangun Alat	43
C. Analisis <i>State Space</i>	47
D. Pengujian Alat dan Metode Penelitian	49
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	54
A. Kesimpulan	54
B. Saran	55
DAFTAR PUSTAKA	56
LAMPIRAN	57

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Perbandingan lampu LED dengan lampu biasa	2
Gambar 2. Spektrum cahaya tampak	7
Gambar 3. (a) Hubungan antara iluminasi dengan hambatan LDR (b) Komponen LDR.	10
Gambar 4. Komponen LED	13
Gambar 5. Rangkaian penguat inverting.....	14
Gambar 6. Diagram blok sistem kontrol closed loop.....	16
Gambar 7. Diagram blok sistem linier dan kontinu dalam state space	22
Gambar 8. Rangkain alat kontrol	27
Gambar 9. Skema karakterisasi LDR.....	29
Gambar 10. Skema pengambilan data.....	30
Gambar 11. Diagram alir tahap penelitian	32
Gambar 12. Hubungan antara log hambatan terhadap log intensitas LDR1.....	35
Gambar 13. Hubungan tegangan keluaran resistor pada rangkaian pembagi tegangan sensor LDR1 terhadap intensitas cahaya.	36
Gambar 14. Hubungan antara log hambatan terhadap log intensitas LDR2.....	38
Gambar 15. Hubungan tegangan keluaran resistor pada rangkaian pembagi tegangan sensor LDR2 terhadap intensitas cahaya.	39
Gambar 16. Hubungan antara log hambatan terhadap log intensitas LDR3.....	40
Gambar 17. Hubungan tegangan keluaran resistor pada rangkaian pembagi tegangan sensor LDR3 terhadap intensitas cahaya.	41
Gambar 18. Rangkaian pembagi tegangan	42
Gambar 19. Rangkaian alat kontrol	43
Gambar 20. Rangkaian penguat selisih.....	44

Gambar 21. Grafik perubahan intensitas yang terjadi pada area tempat baca.	46
Gambar 22. Grafik perubahan nilai resistansi yang terjadi pada sensor sistem (LDR1). .	47
Gambar 23. Grafik perubahan intensitas yang terjadi pada area tempat baca yang disensor oleh LDR1 dan LDR3 serta grafik perubahan tegangan keluaran pada sistem.	50
Gambar 24. Grafik data perubahan tegangan keluaran	52
Gambar 25. Grafik hasil simulasi perubahan tegangan keluaran menggunakan software Matlab.....	52
Gambar 26. Grafik gabungan antara hasil eksperimen dan hasil simulasi.....	53

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Semikonduktor dan bandgap energinya.....	12
Tabel 2. Hasil pengukuran karakterisasi LDR 1	34
Tabel 3. Hasil pengukuran karakterisasi LDR 2.....	36
Tabel 4. Hasil pengukuran karakterisasi LDR 3.....	39
Tabel 5. Hasil pengukuran tegangan keluaran.....	44
Tabel 6. Data monitoring perubahan tegangan keluaran sistem setiap waktu.....	51

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Program simulasi state space menggunakan software Matlab	57
Lampiran 2. Alat kontrol intensitas cahaya	58
Lampiran 3. Tempat pengambilan data.....	58
Lampiran 4. data pengambilan data siang hari.....	59

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

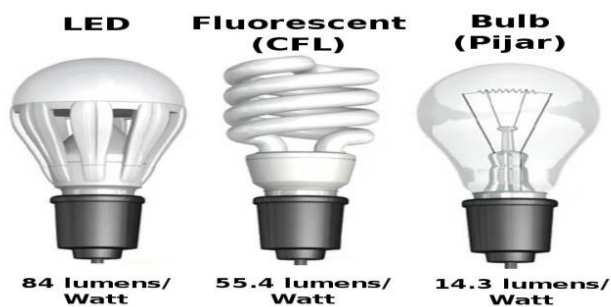
Pada zaman modern ini listrik merupakan kebutuhan yang sangat penting untuk mendukung aktivitas manusia. Aktivitas manusia hampir selalu melibatkan alat-alat elektronik yang membutuhkan energi listrik. Kebutuhan hidup masyarakat semakin tinggi dan biaya yang dibutuhkan semakin mahal, khususnya untuk mengonsumsi energi listrik, sehingga pemerintah berupaya memberikan sosialisasi kepada masyarakat tentang gerakan hemat energi.

Tingginya kebutuhan manusia terhadap alat-alat elektronik akan berdampak pada krisis energi. Hal tersebut karena adanya pemakaian energi listrik yang terlalu boros. Dalam lingkup rumah tangga pemborosan tersebut salah satunya adalah di sektor pencahayaan oleh lampu. Pemborosan tersebut biasanya terjadi karena lampu lupa dimatikan atau sumber pencahayaannya tidak bekerja secara efisien sehingga membutuhkan energi listrik yang sangat besar.

Penggunaan energi secara efisien adalah salah satu solusi untuk mengurangi besar biaya yang dikeluarkan dalam memenuhi kebutuhan listrik. Efisien dalam hal ini bukan berarti mengorbankan kenyamanan dan kebutuhan dalam melakukan aktivitas sehari-hari, misalnya membaca di ruang yang gelap tidak menggunakan lampu agar mengurangi biaya listrik yang dikeluarkan. Contoh tindakan dalam penghematan energi sehingga menghemat biaya listrik adalah penggunaan lampu LED sebagai sumber

pencahayaannya. Lampu LED digunakan sebagai pengganti lampu pijar dan lampu *fluorescent* di mana dapat menghemat penggunaan energi listrik untuk menghasilkan intensitas yang sama. Tindakan selain menggunakan lampu LED ialah memasang *glass block* pada dinding kamar, sehingga pada siang hari bisa dihindari penggunaan lampu.

Sekarang ini lampu LED sudah banyak beredar di masyarakat, sehingga masyarakat sudah banyak beralih menggunakan lampu LED daripada menggunakan lampu pijar maupun lampu *fluorescent*. Pada Gambar 1 disajikan perbandingan arus cahaya atau lumen dari lampu LED, *fluorescent*, dan *bulb* :



Gambar 1. Perbandingan lampu LED dengan lampu biasa

Seperti halnya lampu pijar dan lampu *fluorescent*, lampu LED masih sebatas mengandalkan saklar *on/off* sehingga nyala matinya masih dikendalikan secara manual. Manualnya sistem berdampak pada konsumsi energi yang digunakan pada lampu LED. Lampu yang beredar kebanyakan belum menggunakan sistem pintar hanya sebatas sistem *on/off*. Permasalahan di atas akan berdampak terhadap aktivitas belajar terutama dalam membaca. Lampu ruangan yang masih menggunakan sistem *on/off* akan mengganggu

kegiatan membaca ketika intensitas cahaya berubah terutama pada siang hari di ruangan tempat membaca. Masalah yang biasa muncul ialah ketika belajar yang butuh konsentrasi terjadi perubahan intensitas cahaya pada area baca secara mendadak sehingga harus menyalakan lampu ruangan secara manual, hal tersebut dapat mengganggu konsentrasi pembacanya. Selain itu perubahan intensitas cahaya secara mendadak akan sangat mengganggu kenyamanan dalam kegiatan membaca.

Pencahayaan yang baik adalah unsur penting dalam kegiatan membaca agar pembaca merasa nyaman dalam melakukan kegiatan membaca. Pencahayaan yang bagus ialah pencahayaan yang stabil saat terjadi perubahan intensitas cahaya ruangan. Pencahayaan yang stabil adalah pencahayaan yang mampu mempertahankan besar kecilnya intensitas cahaya secara kontinu saat terjadi perubahan intensitas cahaya ruangan. Setiap orang mempunyai kondisi kenyamanan masing-masing dalam membaca terutama masalah pencahayaan. Kondisi kenyamanan membaca dapat dipengaruhi oleh besar kecilnya intensitas cahaya dan warna sumber cahaya. Besar kecilnya intensitas cahaya disesuaikan dengan kenyamanan masing-masing orang. Berbagai sumber mengatakan bahwa warna sumber cahaya yang paling nyaman untuk membaca ialah warna *warm-white* selain cahaya matahari. Sistem pencahayaan merupakan faktor penting dalam kegiatan membaca, sehingga dalam penelitian ini akan dibuat sebuah lampu baca yang mampu mengontrol intensitas cahaya ketika terjadi perubahan intensitas sesuai dengan *setting point* yang telah ditentukan secara kontinu. Supaya lampu baca yang mampu

mengontrol intensitas cahaya bekerja secara optimal diperlukan sebuah analisis sistem kontrol.

Analisis sistem kontrol selama ini kebanyakan masih menggunakan fungsi transfer dan fungsi respon. Fungsi transfer dan fungsi respon hanya dapat digunakan untuk menganalisis sistem kontrol yang memiliki *single input* dan *single output* (SISO). Oleh karena itu dalam penelitian ini metode analisis yang digunakan adalah metode analisis *state space*. Analisis tersebut lebih fleksibel, karena dapat digunakan untuk menganalisis sistem kontrol yang memiliki *single input single output* (SISO) maupun *multiple inputs multiple outputs* (MIMO).

B. Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang, maka permasalahan yang dihadapi dapat diidentifikasi sebagai berikut :

1. Sistem pencahayaan dalam ruangan masih menggunakan sistem manual.
2. Metode analisis sistem kontrol menggunakan fungsi transfer dan fungsi respon, hanya dapat diterapkan untuk menganalisis sistem *single input single output*.

C. Batasan Masalah

Dalam penelitian ini cakupan permasalahan yang akan diteliti dibatasi pada:

1. Sistem kontrol intensitas cahaya pada lampu baca menggunakan jenis lampu LED yang berwarna *warm-white* dan diatur pada *set point* sekitar 22 lux.

2. Lampu baca tidak mempunyai kemampuan mendeteksi sesuatu selain intensitas cahaya di area baca yang dikontrol. Alat mempunyai kemampuan menyala secara otomatis dengan intensitas yang berubah secara kontinu ketika terjadi perubahan intensitas dalam area membaca.

D. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang masalah dan batasan masalah di atas, perumusan masalah dalam penelitian ini adalah :

1. Bagaimana membuat sebuah lampu baca berbasis LED yang dapat mengontrol intensitas cahaya secara otomatis?
2. Bagaimana analisis sistem kontrol intensitas cahaya menggunakan metode *state space*?

E. Tujuan Penelitian

Berdasarkan perumusan masalah di atas, maka tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Membuat lampu baca berbasis LED yang dapat dikontrol intensitas cahayanya sesuai dengan *set point*.
2. Menganalisis sistem kontrol intensitas cahaya menggunakan metode *state space*.

F. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat antara lain berupa :

1. Sistem yang mampu mengontrol intensitas cahaya dalam area baca yang membutuhkan intensitas cahaya yang tetap.

2. Lampu baca diharapkan dapat menghemat energi listrik dalam sektor pencahayaan.
3. Perancangan, pembuatan dan analisis lampu baca diharapkan dapat dikembangkan untuk penelitian selanjutnya.

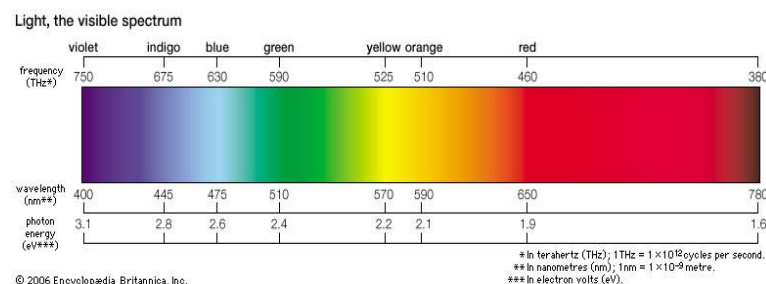
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Cahaya

Cahaya seperti suara adalah sebuah gelombang yang memindahkan energi tanpa disertai pemindahan massa. Cahaya sangat penting untuk seluruh kehidupan di bumi karena seluruh kehidupan di bumi membutuhkan energi dari matahari yang ditransfer ke bumi dalam bentuk radiasi elektron magnetik. Cahaya itu digunakan tumbuh-tumbuhan untuk mensintesis karbohidrat dari karbon dioksida dan air. Cahaya juga diperlukan oleh binatang untuk memperoleh informasi penting dari lingkungannya.

Cahaya adalah gelombang elektromagnetik. Cahaya dipancarkan dan diserap sebagai aliran foton yang diskrit yang membawa energi dan momentum (Smith, et. al, 2007: 1). Cahaya merambat dengan sangat cepat, yaitu dengan kecepatan 3×10^8 m/s, artinya dalam waktu satu sekon cahaya dapat menempuh jarak 300.000.000 m atau 300.000 km. Gelombang elektromagnetik yang memiliki panjang gelombang antara 400 nm dan 700 nm yang dapat dideteksi dengan mata manusia disebut dengan cahaya tampak (Satwiko, 2004: 88). Gambar 2 menunjukan spektrum cahaya tampak.



Gambar 2. Spektrum cahaya tampak (Glenn stark,2018)

1. Satuan Fisika untuk cahaya

a. Kuat cahaya atau Candela (I)

Candela (Cd) adalah intensitas dalam suatu arah, dari satu sumber yang memancarkan radiasi monokromatik dengan frekuensi 540×10^{12} Hz atau panjang gelombang 555 nm (warna kuning kehijauan) dan yang mempunyai intensitas $1/683$ watt per steradian (Smith, et. al, 2007: 483).

Candela diambil dari bahasa Inggris untuk kata lilin yaitu *candle*; satu candela sama dengan nyala dari satu buah lilin yang mengeluarkan cahaya total ke segala arah sebanyak 12,57 lumen. Nilai 12,57 adalah luas kulit bola dengan jari-jari 1 meter dengan sumber cahaya sebagai titik pusatnya (Satwiko, 2004: 88-89) .

b. Arus Cahaya atau Lumen (Φ)

Lumen (lm) adalah jumlah cahaya (Q) yang dipancarkan ke segala arah oleh sumber cahaya per satuan waktu (t). 1 lumen sama dengan banyak cahaya pada 1 m^2 bidang bola berjari-jari 1 m yang memiliki pusat sumber cahaya 1 Cd (Satwiko, 2004: 89). 1 watt sama dengan 680 lumen.

c. Kuat Penerangan atau Lux (E)

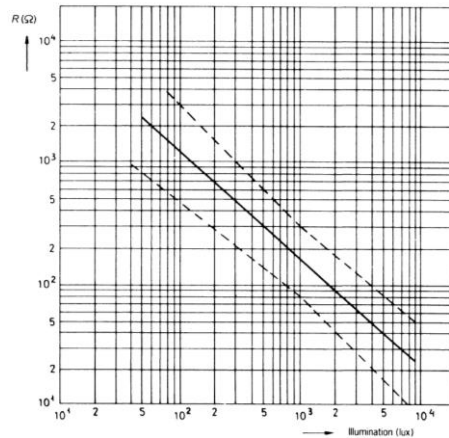
Lux (E) adalah jumlah cahaya yang datang pada satu unit bidang. Satu lux sama dengan iluminansi pada bidang bola berjari-jari 1 m yang memiliki titik pusat sumber cahaya sebesar 1 Cd. Satuan lain yang biasa dipakai pada alat-alat optik yaitu fc (*footcandle*). 1 lm/ft^2 sama dengan 10,76 lux (Satwiko, 2004: 89).

2. Sensor Cahaya

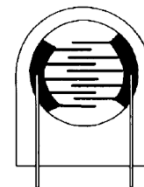
Hampir semua detektor cahaya bertindak sebagai transduser yang menerima foton dan menghasilkan respons yang dapat diperkuat dan diubah menjadi bentuk yang dapat dimengerti oleh manusia. Ada tiga cara dasar yang dilakukan detektor :

- a. Detektor foton merespon langsung ke masing-masing foton. Foton yang diserap melepaskan satu atau lebih pembawa muatan yang terikat dalam detektor yang mungkin memodulasi arus listrik dalam material, bergerak menuju ke penguat output, atau menyebabkan perubahan kimia. Detektor foton digunakan di seluruh wilayah sinar-X, ultraviolet, cahaya tampak, dan inframerah.
- b. Detektor termal menyerap foton dan memanaskan detektor. Umumnya, arus listrik yang melewati detektor membuat energi tersebut mengubah sifat listrik dari bahan detektor. Detektor termal memiliki respon spektral yang sangat luas dan tidak spesifik, tetapi respon spektral tersebut sangat baik digunakan terutama pada panjang gelombang inframerah dan submilimeter, serta sebagai pendeteksi sinar-X.
- c. Penerima yang koheren merespons kekuatan medan listrik dari sinyal dan dapat menyimpan informasi fase tentang foton yang masuk. Penerima dapat beroperasi akibat adanya foton yang terkena medan listrik dari osilator lokal yang koheren. Perangkat ini terutama digunakan di radio dan daerah submillimeter dan kadang-kadang berguna dalam inframerah. (Rieke, 2002: 21).

Salah satu sensor cahaya yang digunakan berupa LDR (*Light Dependent Resistor*) yang didasarkan oleh salah satu cara mendeteksi cahaya yaitu dengan detektor foton. LDR merupakan material semikonduktor berbahan CdS. CdS memiliki respon yang hampir sama dengan respon mata manusia terhadap cahaya (Smith, et. al, 2007: 452). LDR adalah produk semikonduktor antara cadmium sulfida atau cadmium selenide yang diatur dalam pola zig-zag seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3b. Resistansi dari bahan bervariasi terhadap cahaya yang mengenai area pola. Tidak ada sambungan p-n di LDR seperti dalam kasus dioda, sel surya atau LED (Kumar, 2002:8).



(a)



(b)

Gambar 3. (a) Hubungan antara iluminasi dengan hambatan LDR (b) Komponen LDR (Webster.J.G, Pallas-Areny.R, 2001:114&116)

Dalam radiometri, dibutuhkan suatu cara untuk mendeteksi sebuah radiasi elektromagnetik. Cara untuk mendeteksinya yaitu dengan memperlakukan cahaya sebagai foton. Foton memiliki energi :

$$E_{ph} = h\nu = hc/\lambda \quad (2.1)$$

dengan h adalah konstanta Planck ($6,626 \times 10^{-34}$ J s), ν merupakan frekuensi (Hz), λ merupakan panjang gelombang (m), dan c merupakan cepat rambat cahaya (3×10^8 m/s) (Rieke, 2003: 1). Hubungan antara energi foton dan panjang gelombang radiasi (λ) adalah

$$\lambda = \frac{c \times h}{E} \quad (2.2)$$

Jika E dinyatakan dalam elektron-volts ($1eV = 0.1602$ aJ), persamaan (2.2) berkurang menjadi $\lambda (\mu m) = 1.24/E(eV)$. Hubungan antara resistansi R untuk fotokonduktor dan pencahayaan E_n sangat nonlinier. Model yang sederhana adalah

$$R = A \times E_v^{-\alpha} \quad (2.3)$$

dimana A dan α bergantung pada material dan pada parameter manufaktur. Contoh, $0.7 < \alpha < 0.9$ untuk CdS. Gambar 3a menunjukkan hubungan ini untuk diberikan CdS photoresistor dan menunjukkan bahwa, di samping nonlinieritas, rasio antara resistensi saat menyala dan saat gelap lebih besar dari 10^4 (Webster.J.G, Pallas-Areny.R, 2001:115-116).

Sensor cahaya (LDR) terbuat dari bahan semikonduktor yang memiliki nilai *energy gap* tertentu. Setiap warna memiliki panjang gelombang yang berbeda, sehingga energi yang dimiliki oleh setiap warna berbeda. Masing-masing bahan semikonduktor peka terhadap energi foton yang bernilai sama dengan atau melebihi nilai *energy-gap*nya.

Tabel 1. Semikonduktor dan bandgap energinya (Rieke, 2002:35).

Columns	Semiconductor	$E_g(\text{eV})$
IV	Ge	0.67
	Si	1.11
	SiC	2.86
III-V	AlAs	2.16
	AlP	2.45
	AlSb	1.6
	GaAs	1.43
	GaP	2.26
	GaSb	0.7
	InAs	0.36
	InP	1.35
	InSb	0.18
	CdS	2.42
II-VI	CdSe	1.73
	CdTe	1.58
	ZnSe	2.7
	ZnTe	2.25
	AgBr	2.81 ^a
I-VII	AgCl	3.33 ^a
IV-VI	PbS	0.37
	PbSe	0.27
	PbTe	0.29

^a Values taken from James (1977). All other values are taken from Streetman and Banerjee (2000), Appendix III.

3. LED (*Light Emitting Diodes*)

LED adalah perangkat elektronik yang menghasilkan cahaya ketika dialiri arus listrik. Panjang gelombang atau warna dari cahayanya berbeda-beda tergantung pada bahan dasar LED dengan output 25 sampai 100 lumen per watt (Biery, et. al, 2014: 2). Awalnya, LED secara eksklusif digunakan untuk aplikasi dengan kecerahan rendah seperti lampu indikator. Dalam aplikasi ini, efisiensi dan daya optik keseluruhan LED tidak utama. Namun, dalam aplikasi yang lebih baru, misalnya aplikasi lampu lalu lintas, cahaya yang dipancarkan oleh LED harus terlihat bahkan di bawah sinar matahari yang cerah dan dari jarak yang cukup jauh. LED dengan efisiensi dan kecerahan yang tinggi diperlukan untuk aplikasi semacam itu. LED GaAsP dan LED GaAsP yang didoping nitrogen hanya cocok untuk aplikasi dengan

kecerahan rendah. LED AlGaAs cocok untuk aplikasi dengan kecerahan rendah dan tinggi. LED AlGaInP dan GaInN digunakan dalam aplikasi kecerahan tinggi (Schubert, 2006:201).

LED memiliki beberapa keuntungan, diantaranya :

- a. LED dapat memancarkan cahaya dari (25-100) lumen per watt dibanding dengan lampu halogen yang hanya (5-15) lumen per watt atau lampu *fluorescent* yang memiliki (5-90) lumen per watt.
- b. LED memiliki *lifetimes* dari 25000 jam sampai 100000 jam, dibandingkan dengan lampu *incandescent* sekitar 1000 jam atau (15000-40000) jam untuk lampu *fluorescent*.
- c. LED tidak menghasilkan radiasi panas dan juga menghasilkan panas yang paling sedikit dibanding sumber cahaya buatan yang lain.
- d. LED tidak mengandung material yang mencemari lingkungan seperti merkuri pada lampu *fluorescent* (Biery, et. al, 2014: 5).
- e. LED yang digunakan memiliki sudut pancar maksimal sebesar 120 derajat dengan intensitas maksimal 900 lumen. LED bekerja dengan tegangan (9-12) V DC dengan arus listrik sekitar 1000 mA.

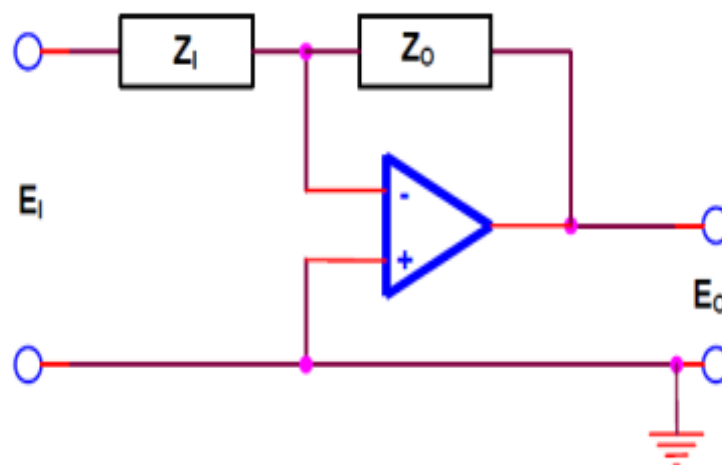


Gambar 4. Komponen LED

B. Penguat Selisih

Sebuah rangkaian penguat selisih dibutuhkan untuk menguatkan selisih antara dua tegangan input. Penguat selisih digunakan untuk menentukan nilai selisih tegangan keluaran suatu sensor terhadap tegangan *set point*. Gambar 5 memperlihatkan bentuk dasar sebuah rangkaian penguat selisih. Tegangan output (E_o) adalah:

$$E_o = -\frac{z_o}{z_i} E_i \quad (2.4)$$



Gambar 5. Rangkaian penguat inverting

Ketika *feedback* digunakan pada op-amp *gain closed loop* dari sistem ditentukan oleh rasio impedansi *input* (z_i) dan impedansi *feedback* (z_o) yang digunakan. *Gain* untuk konfigurasi *feedback closed loop* lebih baik daripada *open loop* pada frekuensi tertentu. Konfigurasi *feedback closed loop* digunakan agar sistem stabil, karena pada penguatan lebih dari 100X (40 dB) sistem cenderung tidak stabil.

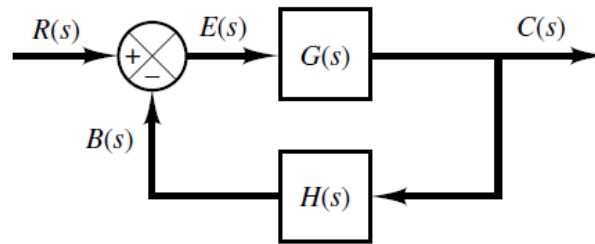
C. Sistem kontrol

Sistem yang mempertahankan hubungan yang ditentukan antara output dan input referensi dengan membandingkannya dan menggunakan perbedaan sebagai alat kontrol disebut sistem kontrol umpan balik. Contohnya adalah sistem pengaturan suhu ruangan. Sistem pengaturan suhu ruangan berupa mengukur suhu ruangan aktual dan membandingkan dengan suhu referensi (suhu yang diinginkan), termostat sebagai aktuator dari keluaran sistem mengubah suhu ruangan sedemikian rupa untuk memastikan suhu ruangan tetap pada tingkat yang diinginkan terlepas dari kondisi luar.

Sistem kontrol umpan balik tidak terbatas pada rekayasa tetapi dapat ditemukan di berbagai bidang non teknik juga. Tubuh manusia adalah umpan balik yang sangat maju sistem pengaturannya. Baik suhu tubuh dan tekanan darah dijaga konstan oleh sarana umpan balik fisiologis. Faktanya, umpan balik menjalankan fungsi vital yang berfungsi agar tubuh manusia relatif tidak sensitif terhadap gangguan eksternal, sehingga memungkinkannya berfungsi benar dalam lingkungan yang berubah (Ogata, 2010:7).

Sistem kontrol umpan balik sering disebut sebagai sistem *closed-loop*. Dalam praktiknya, istilah kontrol umpan balik dan kontrol *closed-loop* digunakan secara bergantian. Dalam sistem kontrol *closed-loop* sinyal kesalahan merupakan perbedaan antara sinyal *input* dan sinyal umpan balik (yang dapat berupa sinyal keluaran itu sendiri atau fungsi dari sinyal keluaran dan turunannya atau integralnya), diumpankan ke *controller* untuk mengurangi kesalahan dan membawa *output* sistem ke nilai yang diinginkan.

Istilah kontrol *closed-loop* selalu menyiratkan penggunaan aksi kontrol umpan balik untuk mengurangi kesalahan sistem (Ogata, 2010:8). Gambar 6 merupakan diagram blok dari sistem *closed loop*.



Gambar 6. Diagram blok sistem kontrol closed loop (Ogata, 2010:19).

Output diumpan kembali ke *summing point*, dimana *output* dibandingkan dengan input referensi $R(s)$. *Output* $C(s)$ diperoleh dengan mengalikan *input* $E(s)$ dengan fungsi transfer $G(s)$. Setiap sistem kontrol linier dapat digambarkan oleh diagram blok yang terdiri dari *summing point* dan *branch point*. Ketika *output* diumpankan kembali ke *summing point* untuk dibandingkan dengan *input*, perlu mengubah dimensi sinyal *output* agar dapat dibandingkan dengan sinyal input ketika keduanya mempunyai dimensi yang berbeda (Ogata 2010:18).

Sistem pada Gambar 6 hubungan *output* $C(s)$ dan *input* $R(s)$ dapat dirumuskan :

$$C(s) = G(s)E(s) \quad (2.5)$$

$$E(s) = R(s) - B(s) \quad (2.6)$$

$$= R(s) - H(s)C(s) \quad (2.7)$$

Substitusi $E(s)$ dari persamaan (2.7) ke persamaan (2.5) menghasilkan :

$$C(s) = G(s)[R(s) - H(s)C(s)] \quad (2.8)$$

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1+G(s)H(s)} \quad (2.9)$$

Fungsi transfer yang menghubungkan $C(s)$ dengan $R(s)$ disebut *closed-loop transfer function*. Fungsi tersebut terkait dengan sistem dinamik *closed-loop* untuk *feedforward* dan *feedback* (Ogata,2010:19).

Sistem pada Gambar 6 didapatkan persamaan output sebagai berikut:

$$C(s) = \frac{G(s)}{1+G(s)H(s)} R(s) \quad (2.10)$$

Dalam teori kontrol fungsi transfer biasanya digunakan untuk karakterisasi hubungan *input-output* pada komponen atau sistem linier parameter konstan. Fungsi transfer sistem linier parameter konstan didefinisikan sebagai perbandingan dari transformasi Laplace keluaran dan transformasi Laplace masukan dengan asumsi semua kondisi awal bernilai nol. Sistem linier parameter konstan dinyatakan dengan persamaan (2.11) yang disebut persamaan differensial linier.

$$a_0 y^n + a_1 y^{n-1} + \dots + a_{n-1} \dot{y} + a_n y = b_0 x^m + b_1 x^{m-1} + \dots + b_{m-1} \dot{x} + b_m x \quad (2.11)$$

dengan $(n \geq m)$, y adalah keluaran sistem, dan x adalah masukan sistem. Fungsi transfer dari sistem ini diperoleh dengan mencari transformasi Laplace dari kedua ruas persamaan (2.11) dengan asumsi semua kondisi awal bernilai nol (Ogata, 2010:15).

$$\begin{aligned} \text{Fungsi transfer} = G(s) &= \frac{\mathcal{L}[\text{keluaran}]}{\mathcal{L}[\text{masukan}]} \Big|_{\text{keadaan awal nol}} \\ &= \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \dots + b_{m-1} s + b_m}{a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + a_n} \end{aligned} \quad (2.12)$$

Penerapan konsep fungsi transfer terbatas pada sistem yang linier dan *time invariant*.

D. State-space

Saat ini sistem kontrol modern menuju ke sistem yang mempunyai kompleksitas yang lebih besar, terutama disebabkan karena sistem yang kompleks dan berakurasi tinggi. Sistem yang kompleks memiliki beberapa *input* dan beberapa *output* yang linier terhadap waktu. Sistem kontrol sekarang mempunyai peningkatan kompleksitas, maka pada tahun 1960 dikembangkan pendekatan baru dengan konsep *state*.

Teori kontrol modern berbeda dengan teori kontrol konvensional atau klasik dimana teori kontrol modern berlaku untuk sistem *multiple input*, *multiple output* yang mungkin linear atau non linear, dan tergantung terhadap waktu atau tidak. Sedangkan teori kontrol konvensional hanya berlaku untuk sistem linear *single input*, *single output*. Teori kontrol modern pada dasarnya pendekatan pada domain waktu dimana teori tersebut bekerja pada domain waktu, sementara teori kontrol konvensional adalah pendekatan domain frekuensi kompleks dimana teori tersebut masih membutuhkan pendekatan transformasi Laplace yang selanjutnya dikembalikan lagi ke domain waktu. Hal tersebut membuat teori kontrol konvensional kurang efisien waktu dalam menganalisis suatu sistem, sehingga sekarang didorong untuk menggunakan teori kontrol modern (Ogata, 2010:29).

State sistem dinamis adalah variabel paling pokok yang terdapat dari suatu sistem yang biasa disebut *state variable*, sehingga ketika nilai variabel tersebut pada $t = t_0$ bersama dengan nilai *input* saat $t \geq t_0$ diketahui, maka

dapat ditentukan perilaku sistem secara lengkap untuk setiap saat $t \geq t_0$ (Ogata, 2010:29). Apabila paling sedikit terdapat n variabel x_1, x_2, \dots, x_n yang dibutuhkan untuk mendeskripsikan perilaku sistem dinamis, maka n variabel tersebut adalah himpunan variabel *state*. *Input* saat $t \geq t_0$ dan keadaan awal diketahui, sehingga keadaan selanjutnya ($t \geq t_0$) dapat ditentukan (Ogata, 2010: 29). n variabel *state* dibutuhkan untuk mendeskripsikan perilaku sistem, maka n variabel *state* dapat dianggap sebagai n komponen vektor \mathbf{x} . Vektor tersebut disebut vektor *state*. Vektor *state* menentukan sistem *state* $\mathbf{x}(t)$ untuk waktu $t \geq t_0$, jika *state* saat $t = t_0$ dan *input* $u(t)$ untuk $t \geq t_0$ diketahui (Ogata, 2010: 30).

Space dimensi n yang sumbu koordinat-nya terdiri dari sumbu x_1 , sumbu x_2 , ..., sumbu x_n , dimana x_1, x_2, \dots, x_n adalah variabel *state* disebut *state space*. Dalam analisis *state space* terdapat tiga jenis variabel yang terlibat dalam pemodelan sistem dinamis yaitu variabel *input*, variabel *output*, dan *state variable*. Sistem dinamis harus melibatkan memori penyimpanan nilai input untuk $t \geq t_1$. Dikarenakan integrator dalam sistem kontrol yang kontinu berfungsi sebagai perangkat memori, *output* dari integrator dianggap sebagai variabel yang menentukan keadaan berikutnya dan disebut variabel *state*. Jumlah variabel *state* yang mendefinisikan sistem secara lengkap mempunyai jumlah yang sama dengan jumlah integrator yang terlibat dalam sistem (Ogata, 2010:30). $\dot{x}_1(t), \dot{x}_2(t), \dots, \dot{x}_n(t)$ adalah persamaan *state space* dimana setiap $\dot{x}(t)$ merupakan persamaan differensial orde 1; banyaknya $\dot{x}(t)$ tergantung pada berapa banyak parameter yang terlibat dalam analisis

sistem atau berapa banyak persamaan orde n yang dimiliki oleh sistem. Persamaan tersebut merupakan penyederhanaan persamaan apabila sistem yang akan dianalisis memiliki persamaan orde 2 atau lebih; hal tersebut merupakan ciri khas dari metode *state space* dalam menganalisis sebuah sistem. $\dot{x}(t)$ memiliki persamaan fungsi yang didalamnya terdapat variabel *state* dan *input* yang berubah terhadap waktu. $y_1(t), y_2(t), \dots, y_m(t)$ adalah persamaan yang mendeskripsikan keluaran sistem, dimana jumlah persamaan untuk $y(t)$ sama dengan jumlah persamaan $\dot{x}(t)$. Asumsikan sistem memiliki *multi-input, multi-output* sistem melibatkan n integrator. Asumsikan juga bahwa r input $u_1(t), u_2(t), \dots, u_r(t)$ dan m output $y_1(t), y_2(t), \dots, y_m(t)$. Menentukan n integrator *output* sebagai variabel *state*: $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$ (Ogata, 2010:30). Jika sistem bersifat linier dan invarian waktu serta variabel *state* dengan n integrator, variabel *input* dengan r integrator dan variabel *output* dengan m integrator, maka sistem memiliki persamaan *state* sebagai berikut (Ogata, 2004:170):

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1(t) &= a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n + b_{11}u_1 + b_{12}u_2 + \dots + b_{1r}u_r \\
 \dot{x}_2(t) &= a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n + b_{21}u_1 + b_{22}u_2 + \dots + b_{2r}u_r \\
 &\vdots \\
 &\vdots \\
 &\vdots \\
 \dot{x}_n(t) &= a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \dots + a_{nn}x_n + b_{n1}u_1 + b_{n2}u_2 + \dots + b_{nr}u_r \quad (2.13)
 \end{aligned}$$

Output memiliki bentuk persamaan sebagai berikut :

$$y_1(t) = c_{11}x_1 + c_{12}x_2 + \dots + c_{1n}x_n + d_{11}u_1 + d_{12}u_2 + \dots + d_{1r}u_r$$

$$y_2(t) = c_{21}x_1 + c_{22}x_2 + \dots + c_{2n}x_n + d_{21}u_1 + d_{22}u_2 + \dots + d_{2r}u_r$$

.

.

.

$$y_m(t) = c_{m1}x_1 + c_{m2}x_2 + \dots + c_{mn}x_n + d_{m1}u_1 + d_{m2}u_2 + \dots + d_{mr}u_r \quad (2.14)$$

dimana koefisien a_{ij} , b_{ij} , c_{ij} dan d_{ij} adalah konstan dan mungkin beberapa dari koefisien tersebut bernilai nol. Jika digunakan vektor-matriks untuk merepresentasikannya, maka persamaan (2.13) dan (2.14) menjadi :

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}(t)\mathbf{u}(t) \quad (2.15)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}(t)\mathbf{u}(t) \quad (2.16)$$

dimana

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}, \mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1r} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2r} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \dots & b_{nr} \end{bmatrix}, \mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_r \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_m \end{bmatrix}, \mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ c_{m1} & c_{m2} & \dots & c_{mn} \end{bmatrix}, \mathbf{D} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1r} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2r} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ d_{n1} & d_{n2} & \dots & d_{nr} \end{bmatrix}$$

$\mathbf{A}(t)$ disebut matriks *state*, $\mathbf{B}(t)$ matriks masukan, $\mathbf{C}(t)$ matriks keluaran, dan $\mathbf{D}(t)$ matriks transmisi langsung (Ogata, 2010:31). Vektor \mathbf{x} , \mathbf{u} dan \mathbf{y} masing-masing adalah vektor *state*, vektor *input* dan vektor *output*. Dalam analisis sistem kontrol matriks *input* \mathbf{B} dan vektor *input* \mathbf{u} disebut matriks kontrol dan vektor kontrol secara berurutan (Ogata, 2003:171). Elemen yang terdapat dalam vektor \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} dan \mathbf{D} merupakan parameter yang dipakai dalam

analisis, misal resistansi, kapasitansi atau induktansi dan sebagainya. Parameter sistem dalam aplikasinya ada 2 jenis yaitu invarian dan varian waktu.

Gambar 7. Diagram blok sistem linier dan kontinu dalam state space

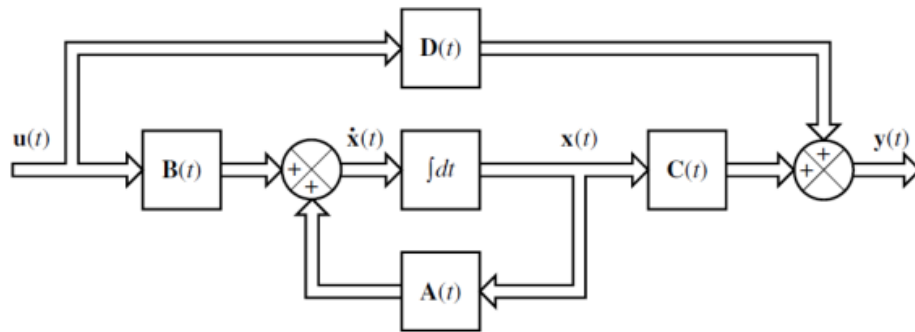


Diagram blok di atas merepresentasikan persamaan (2.15) dan (2.16). $\dot{x}_1(t)$ adalah persamaan differensial sistem yang didapat dari sistem dan $y(t)$ adalah persamaan keluaran sistem. Apabila fungsi tidak melibatkan waktu (t) secara eksplisit maka sistem disebut sistem yang tidak bergantung pada perubahan waktu (invarian), dalam artian parameter yang terlibat dalam sistem nilainya tidak berubah terhadap waktu. Dengan demikian persamaan (2.15) dan (2.16) dapat disederhanakan sebagai berikut :

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \quad (2.17)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}\mathbf{u}(t) \quad (2.18)$$

Persamaan (2.17) adalah persamaan *state* untuk sistem linier, tidak bergantung pada perubahan waktu dan persamaan (2.18) adalah *output* untuk sistem yang sama.

BAB III

METODE PENELITIAN

A. Waktu dan Tempat Penelitian

1. Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Desember 2018 sampai Juni 2019.

2. Tempat Penelitian

- a. Pengukuran dan karakterisasi sensor LDR, penguat diferensial dan arus, serta LED dilakukan di Laboratorium Elektronika dan Instrumentasi, Jurusan Pendidikan Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Negeri Yogyakarta.
- b. Pembuatan desain rangkaian kontrol, perakitan alat, dan pengujian alat dilakukan di tempat peneliti (Druwo RT 02 Bangunharjo, Sewon, Bantul).

B. Variabel Penelitian

1. Variabel bebas : Intensitas cahaya (I_x), yaitu intensitas cahaya di dalam ruangan yang berasal dari semua sumber cahaya termasuk dari lampu LED.
2. Variabel terikat : Resistansi(R), tegangan (V), dan daya (W).
Adanya perubahan intensitas cahaya, nilai resistansi pada sensor LDR akan berubah. Perubahan nilai resistansi pada sensor LDR mengakibatkan perubahan nilai tegangan pada

keluaran rangkaian sensor LDR sehingga menyebabkan tegangan *output* dan daya keluaran pada lampu LED akan berubah.

3. Variabel kontrol : Suhu (T), yaitu suhu disekitar sensor-sensor LDR yang dapat mempengaruhi hasil pengukuran.

C. Alat dan Bahan Penelitian

1. Resistor.
2. Adaptor 12 V 0,1 A.
3. LDR sebagai sensor intensitas cahaya.
4. PCB.
5. IC LM 358 sebagai penguat selisih.
6. Tripot 10 k Ω sebagai pengatur daerah (*range*) tegangan keluaran.
7. Multimeter.
8. *Software* Origin.
9. *Software* MS Excel.
10. *Software* Matlab.
11. *Software* Proteus.
12. Arduino Uno sebagai hardware yang membantu merekam perubahan tegangan setiap 0,5 sekon .
13. Lampu LED 3 watt sebanyak 1 buah.
14. Kabel.

D. Teknik Pengambilan Data

Proses pengambilan data terbagi menjadi tiga bagian, yaitu tahap rancang bangun alat, tahap pengujian alat, dan tahap pengambilan data.

1. Tahap Rancang Bangun Alat

Tahap rancang bangun alat merupakan proses yang dilakukan untuk menentukan desain alat dan rangkaian kontrol yang dipakai, dari pembuatan desain alat hingga alat siap untuk difungsikan. Pembuatan alat dilakukan di tempat peneliti (Druwo RT 02, Bangunharjo, Sewon, Bantul) dan di Laboratorium Elektronika dan Instrumentasi FMIPA UNY pada bulan Desember 2018 sampai bulan Juni 2019. Tahap rancang bangun alat terdiri dari dua bagian, yaitu :

a. Perancangan Desain Alat

1) Konstruksi Alat Kontrol Intensitas Cahaya

Konstruksi alat kontrol terdiri dari komponen utama lampu LED sebagai aktuator, LDR sebagai sensor, dan rangkaian kontrol, serta komponen pendukung seperti PCB dan adaptor.

2) Konstruksi Ruang yang Dikontrol Intensitas Cahayanya

Alat yang dibuat hanya sebatas alat penerangan untuk membaca yang mempunyai kemampuan menerangi area baca. Alat yang dibuat diletakkan di meja baca dengan posisi sensor menghadap ke atas dan lampu LED menghadap ke bawah diharapkan cahaya pada area baca dapat menerangi area baca dan dapat disensor

sehingga dapat bersifat otomatis perubahan intensitas cahaya dari lampu LED ketika terjadi perubahan intensitas cahaya.

b. Perancangan Rangkaian Sistem Kontrol

Sistem kontrol intensitas cahaya dirancang secara *closed-loop*.

Beberapa tahapan perancangan dan pembuatan alat adalah sebagai berikut:

1) Rangkaian Sumber Daya

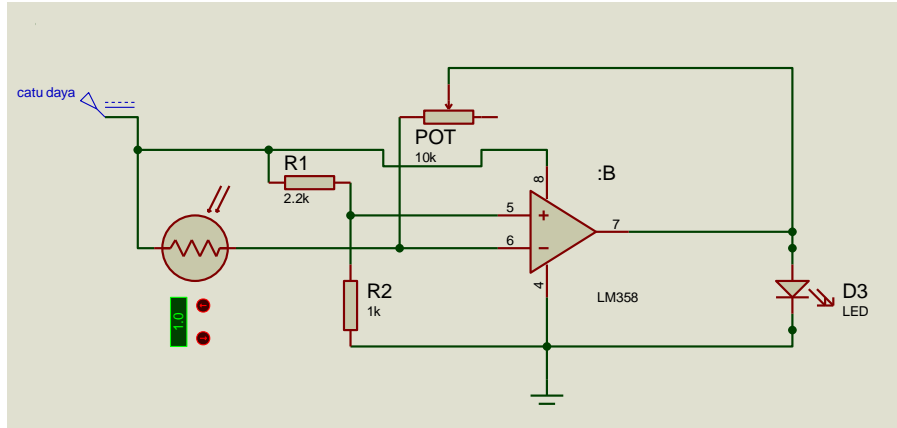
Dalam penelitian ini digunakan adaptor 12 V 0,1 A yang sudah jadi karena hanya sebagai catu daya sebuah lampu baca yang akan ditempatkan di area baca.

2) Perancangan Rangkaian Sensor

Rancangan sensor terdiri dari LDR yang memiliki perubahan nilai hambatan ketika terjadi perubahan intensitas cahaya. Dalam rangkaian ini diperlukan rangkaian sensor untuk mengubah nilai hambatan LDR menjadi tegangan.

3) Perancangan Rangkaian Kontrol dan Aktuator

Rangkaian kontrol dan aktuator terdiri dari penguat selisih. Penguat selisih yang digunakan ialah *op-amp* LM358 yang mempunyai 2 buah *op-amp*. LED sebagai aktuator *output* dari hasil selisih antara tegangan dari rangkaian sensor LDR dan tegangan referensi dimana *op-amp* LM358 sebagai komparatornya.



Gambar 8. Rangkain alat kontrol

4) Prinsip Kerja Rangkaian Sistem Kontrol

Prinsip kerja sistem kontrol ialah LED menyala dengan intensitas yang berubah sesuai dengan perubahan intensitas cahaya pada area baca secara kontinu. Perubahan intensitas cahaya pada area baca mempengaruhi nilai resistansi pada LDR, sehingga keluaran tegangan rangkaian sensor berubah. Perubahan tegangan keluaran rangkaian sensor berdampak pada perubahan keluaran tegangan komparator, sehingga menyebabkan LED dapat menyala dengan intensitas berubah-ubah.

2. Tahap Pengujian Alat

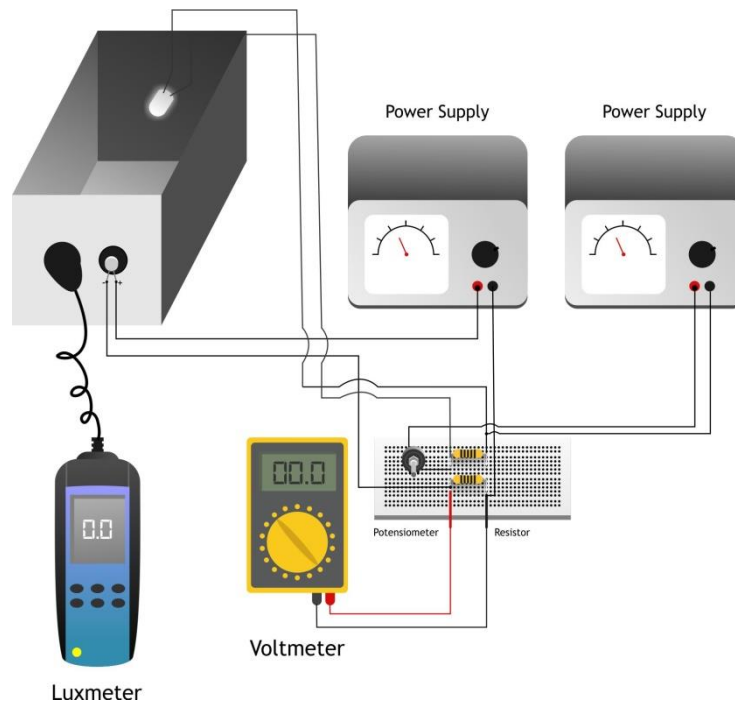
Tahap ini dilakukan untuk mengetahui apakah alat ini dapat bekerja dengan optimal. Pengujian alat dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut:

a. Pengujian Sensor LDR

Pengujian sensor LDR dilakukan untuk mengetahui perubahan hambatan sensor terhadap perubahan intensitas cahaya. Langkah-langkah dalam pengujian ini adalah:

- 1) Mengkarakterisasi sensor LDR. Langkah-langkah dalam karakterisasi LDR sebagai berikut :
 - a) Menyiapkan alat yang diperlukan.
 - b) Meletakkan luxmeter dan LDR sejajar pada ujung kotak, meletakkan LED di ujung yang lain.
 - c) Membuat rangkaian pembagi tegangan dimana salah satu nilai resistansi didapat dari nilai resistansi LDR yang sudah dipasang.
 - d) Menyalakan LED dan memvariasi intensitas cahaya dari LED.
 - e) Mencatat tegangan keluaran dari rangkaian pembagi tegangan dan nilai intensitas cahaya setiap perubahan intensitas cahaya dari LED yang diterima oleh sensor LDR.
 - f) Menganalisis data menggunakan *software* Origin .
- 2) Apabila langkah 1 sesuai dengan teori, maka lanjut ke langkah 3, apabila tidak diulangi.
- 3) Menyusun rangkaian pembagi tegangan.
- 4) Mengukur tegangan keluaran dari rangkaian pembagi tegangan ketika terjadi perubahan hambatan LDR pada intensitas cahaya tertentu.

- 5) Persamaan pembagi tegangan, didapat hubungan antara tegangan keluaran dengan intensitas cahaya.



Gambar 9. Skema karakterisasi LDR

b. Menguji Rangkaian Sistem Kontrol

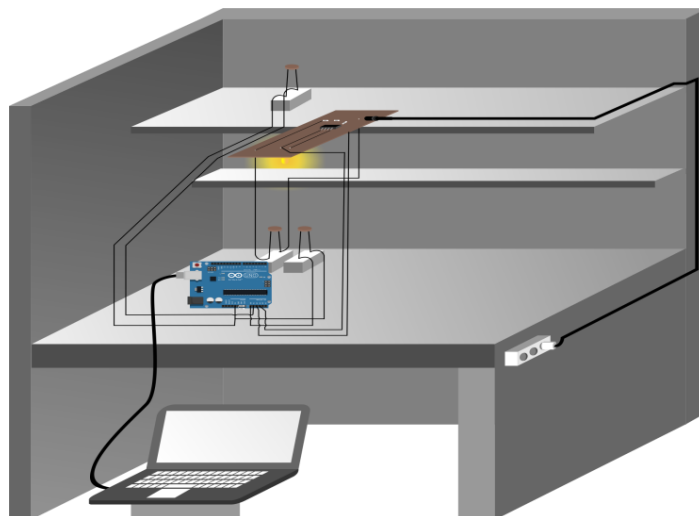
Pada penelitian ini untuk mengetahui sistem yang dibuat mampu bekerja sesuai dengan keinginan atau tidak, maka perlu dilakukan langkah-langkah sebagai berikut:

- 1) Memasang alat pada area baca yang telah dikondisikan.
- 2) Mengukur perubahan intensitas cahaya setiap 0,5 sekon dan tegangan pada lampu LED menggunakan Arduino.
- 3) Mencatat data di tabel.
- 4) Menganalisis data menggunakan *software* MS.Excel.
- 5) Menganalisis data menggunakan *software* Origin.

3. Tahap Pengambilan Data

Tahap ini dilakukan untuk mengambil data keluaran dari sistem yang dibuat. Pengambilan data dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut:

- a. Menyiapkan alat yang diperlukan.
- b. Merancang alat sesuai dengan Gambar 10. Meletakkan alat pada tempat membaca.
- c. Pengukuran dilakukan pada siang hari.
- d. Mencatat data hasil pengamatan.
- e. Menganalisis data menggunakan *software* MS.Excel.
- f. Menganalisis data menggunakan *software* Origin.
- g. Menganalisis data menggunakan *software* Matlab.
- h. Membandingkan hasil analisis data menggunakan *software* Origin dan hasil analisis data menggunakan *software* Matlab.
- i. Semua data ditampilkan dalam tabel dan grafik.



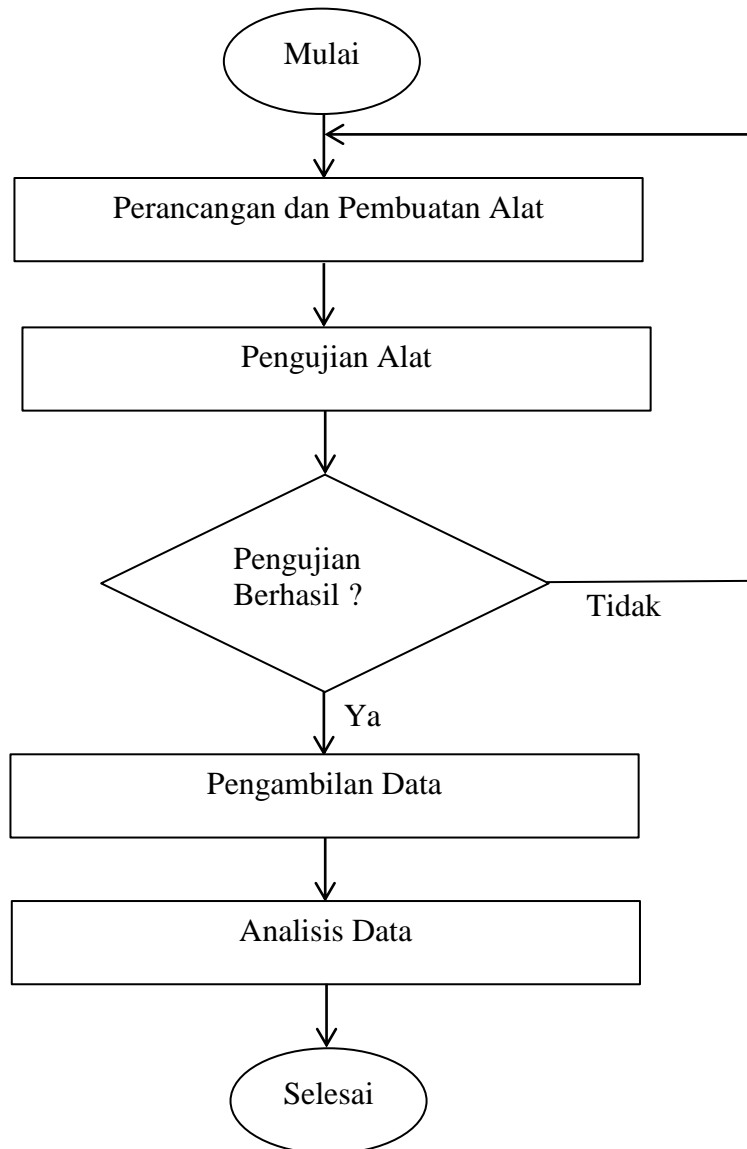
Gambar 10. Skema pengambilan data.

E. Teknik Analisis Data

Langkah-langkah analisis data dalam penelitian ini adalah:

1. Menganalisis rangkaian sistem kontrol.
2. Setiap komponen dicari hubungan masukan dan keluarannya lalu dibuat grafik untuk mencari fungsi masing-masing komponen.
3. Hasil karakterisasi sebagai sumber kalibrasi pengukuran intensitas cahaya.
4. Menganalisis data pengujian rangkaian sistem kontrol menggunakan metode *state space*.
5. Membandingkan hasil analisis menggunakan metode *state space* yang diimplementasikan ke program Matlab dan data eksperimen.

6. **Diagram alir tahapan penelitian**



Gambar 11. Diagram alir tahap penelitian

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Karakteristik LDR

LDR digunakan sebagai sensor cahaya karena memiliki respon yang hampir sama dengan mata manusia. Mata manusia memiliki respon tertinggi pada cahaya dengan panjang gelombang 500-600 nm (schils:2001), sedangkan LDR dengan bahan dasar CdS (cadmium sulfide), menurut *datasheet* (www.sunrom.com/p-510.html, 2008), memiliki respon tertinggi pada panjang gelombang sekitar 520 nm, dan sekitar 513 nm secara perhitungan berdasarkan data nilai *energy gap* CdS. Berdasarkan *datasheet* tersebut, LDR memiliki respon tertinggi di warna kuning.

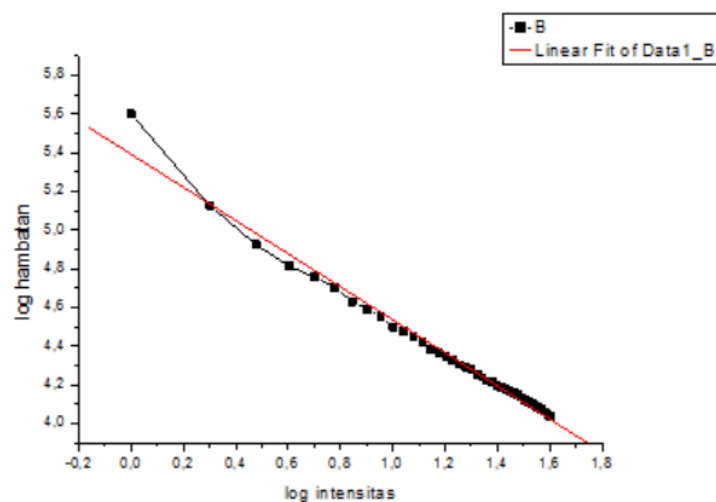
LDR merupakan fotosel yang memiliki *input* berupa intensitas cahaya (lx) dan *output* berupa nilai resistansi (Ω). LDR merupakan sensor yang bersifat resistif, sehingga mudah digunakan dalam rangkaian pembagi tegangan untuk mengubah perubahan nilai resistansi ke perubahan nilai tegangan. Dalam penelitian ini dibutuhkan 3 LDR untuk dikarakterisasi, 1 LDR untuk sistem kontrol dan 2 LDR untuk memonitor perubahan intensitas yang terjadi. Berikut hasil karakterisasi input dan output LDR.

Tabel 2. Hasil karakterisasi LDR 1

Intensitas (lx)	Tegangan (volt)	Hambatan (ohm)	log Intensitas	log Hambatan
1	0,12	396093,33	0,00000	5,59780
2	0,34	133495,29	0,30103	5,12547
3	0,52	83913,85	0,47712	4,92383
4	0,65	65183,08	0,60206	4,81413
5	0,73	56972,33	0,69897	4,75566
6	0,81	50383,46	0,77815	4,70229
7	0,93	42625,59	0,84510	4,62967
8	1	38960,00	0,90309	4,59062
9	1,08	35352,59	0,95424	4,54842
10	1,18	31531,19	1,00000	4,49874
11	1,22	30178,03	1,04139	4,47969
12	1,29	28011,94	1,07918	4,44734
13	1,35	26334,07	1,11394	4,42052
14	1,44	24079,44	1,14613	4,38165
15	1,49	22944,56	1,17609	4,36068
16	1,53	22090,07	1,20412	4,34420
17	1,58	21082,78	1,23045	4,32393
18	1,63	20137,30	1,25527	4,30400
19	1,66	19597,35	1,27875	4,29220
20	1,7	18907,06	1,30103	4,27662
21	1,76	17930,45	1,32222	4,25359
22	1,8	17315,56	1,34242	4,23844
23	1,85	16584,32	1,36173	4,21970
24	1,86	16442,80	1,38021	4,21598
25	1,91	15757,38	1,39794	4,19748
26	1,93	15449,66	1,41497	4,18892
27	1,96	15064,75	1,43136	4,17796
28	1,99	14691,44	1,44716	4,16706
29	2,02	14329,19	1,46240	4,15622
30	2,05	13977,53	1,47712	4,14543
31	2,08	13636,00	1,49136	4,13469
32	2,11	13304,16	1,50515	4,12399
33	2,14	12981,62	1,51851	4,11333
34	2,17	12667,98	1,53148	4,10271
35	2,20	12362,87	1,54407	4,09212
36	2,23	12065,97	1,55630	4,08156
37	2,26	11776,94	1,56820	4,07103
38	2,29	11495,47	1,57978	4,06053

39	2,32	11221,26	1,59106	4,05004
40	2,35	10954,05	1,60206	4,03957

Berdasarkan *datasheet* LDR, hubungan antara log intensitas dan log resistansi memiliki fungsi yang linier. Berikut hasil plot linier antara log hambatan terhadap log intensitas dengan bantuan *software* Origin.



Gambar 12. Hubungan antara log hambatan terhadap log intensitas LDR1.

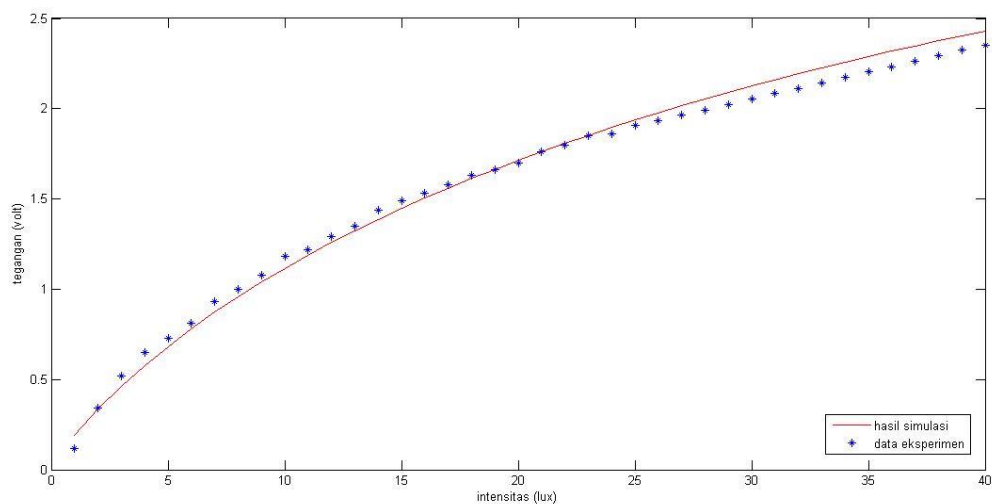
Hasil kalibrasi LDR 1

Linear Regression for Data1_B:

$$Y = A + B * X$$

Parameter	Value	Error		
A	5,39096	0,02193		
B	-0,85555	0,01747		
R	SD	N	P	
-0,99217	0,04139	40	<0.0001	

Fungsi linier dari plot Gambar 12 adalah $\log R = (5,39 \pm 0,02) - ((0,86 \pm 0,02)(\log E))$, dimana E adalah intensitas cahaya. Fungsi linier dari \log intensitas dan \log hambatan menunjukkan bahwa kalibrasi yang dilakukan telah sesuai dengan informasi pada *datasheet* LDR. Nilai tegangan keluaran pada pembagi tegangan jika diplot dengan intensitas sebagai variabel bebasnya tampak seperti grafik berikut.



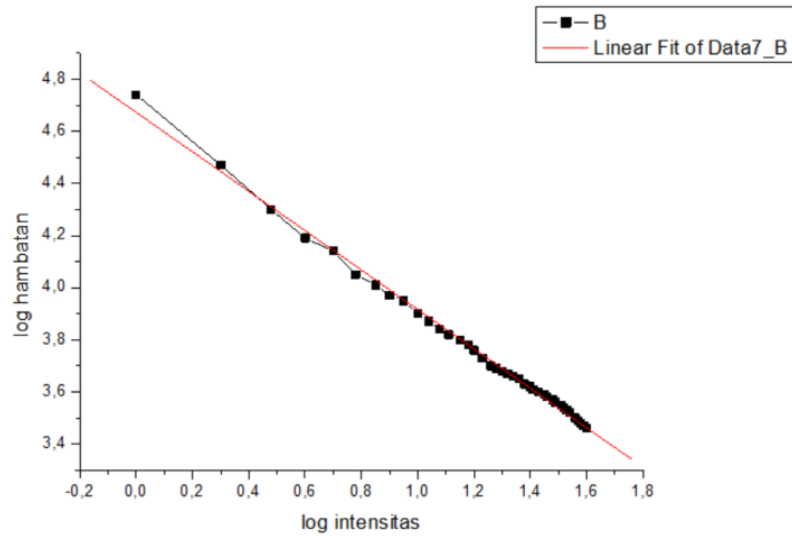
Gambar 13. Hubungan tegangan keluaran resistor pada rangkaian pembagi tegangan sensor LDR1 terhadap intensitas cahaya.

Tabel 3. Hasil karakterisasi LDR 2.

Intensitas (lx)	Tegangan (volt)	Hambatan (ohm)	log Intensitas	log Hambatan
1	0,76	54338,95	0,00	4,74
2	1,23	29853,50	0,30	4,47
3	1,63	20137,30	0,48	4,30
4	1,93	15493,16	0,60	4,19
5	2,08	13673,46	0,70	4,14
6	2,31	11342,25	0,78	4,05
7	2,43	10301,15	0,85	4,01
8	2,54	9433,23	0,90	3,97
9	2,61	8919,00	0,95	3,95
10	2,74	8033,72	1,00	3,90
11	2,84	7407,89	1,04	3,87

12	2,93	6881,16	1,08	3,84
13	2,98	6602,28	1,11	3,82
14	3,04	6279,74	1,15	3,80
15	3,1	5969,68	1,18	3,78
16	3,13	5819,11	1,20	3,76
17	3,21	5431,34	1,23	3,73
18	3,29	5062,43	1,26	3,70
19	3,32	4928,67	1,28	3,69
20	3,35	4797,31	1,30	3,68
21	3,38	4668,28	1,32	3,67
22	3,4	4583,53	1,34	3,66
23	3,44	4416,98	1,36	3,65
24	3,47	4294,58	1,38	3,63
25	3,49	4214,15	1,40	3,62
26	3,52	4108,34	1,41	3,61
27	3,54	4010,59	1,43	3,60
28	3,57	3914,21	1,45	3,59
29	3,59	3819,16	1,46	3,58
30	3,62	3725,44	1,48	3,57
31	3,64	3633,00	1,49	3,56
32	3,67	3541,82	1,51	3,55
33	3,69	3451,87	1,52	3,54
34	3,72	3363,14	1,53	3,53
35	3,74	3275,59	1,54	3,52
36	3,77	3189,20	1,56	3,50
37	3,79	3103,96	1,57	3,49
38	3,82	3019,83	1,58	3,48
39	3,84	2936,79	1,59	3,47
40	3,87	2854,83	1,60	3,46

Hubungan antara log intensitas dan log resistansi memiliki fungsi yang linier menurut *datasheet* LDR. Grafik di bawah ini merupakan hasil dari plotting linier antara log hambatan dan log intensitas dengan *software* Origin.



Gambar 14. Hubungan antara log hambatan terhadap log intensitas LDR2.

Hasil kalibrasi LDR 2

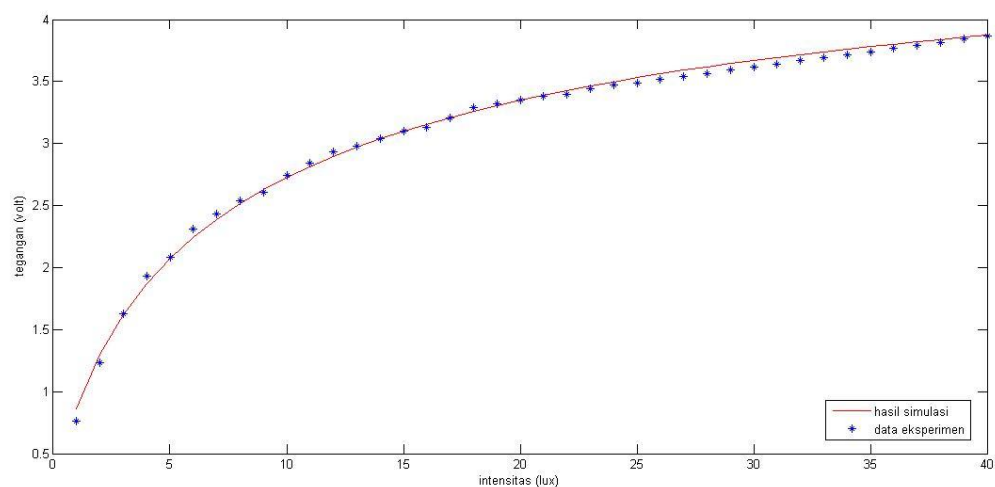
Linear Regression for Data7_B:

$$Y = A + B * X$$

Parameter	Value	Error
A	4,67229	0,0094
B	-0,75604	0,00749

R	SD	N	P
-0,99814	0,01773	40	<0.0001

Gambar 14 memiliki sebuah fungsi linier yaitu $\log R = (4,672 \pm 0,009) - ((0,756 \pm 0,007)(\log E))$, dimana E adalah intensitas cahaya. Fungsi linier dari Gambar 3 yang mendeskripsikan hubungan antara log intensitas dan log hambatan telah sesuai dengan informasi pada *datasheet* LDR. Nilai tegangan keluaran resistor pada rangkaian pembagi tegangan LDR2 sebagai fungsi intensitas tampak seperti grafik berikut.



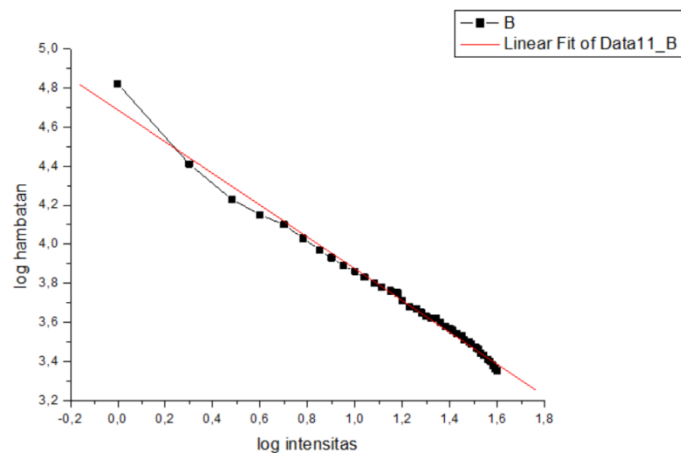
Gambar 15. Hubungan tegangan keluaran resistor pada rangkaian pembagi tegangan sensor LDR2 terhadap intensitas cahaya.

Tabel 4. Hasil karakterisasi LDR 3.

Intensitas (lx)	Tegangan (volt)	Hambatan (ohm)	log Intensitas	log Hambatan
1	0,64	66353,75	0,00	4,82
2	1,38	25549,86	0,30	4,41
3	1,83	16872,02	0,48	4,23
4	2,04	14132,55	0,60	4,15
5	2,17	12702,40	0,70	4,10
6	2,37	10808,52	0,78	4,03
7	2,55	9358,04	0,85	3,97
8	2,66	8568,27	0,90	3,93
9	2,77	7841,23	0,95	3,89
10	2,87	7228,64	1,00	3,86
11	2,96	6712,70	1,04	3,83
12	3,04	6279,74	1,08	3,80
13	3,1	5969,68	1,11	3,78
14	3,14	5769,55	1,15	3,76
15	3,18	5574,47	1,18	3,75
16	3,27	5152,97	1,20	3,71
17	3,34	4840,84	1,23	3,68
18	3,38	4668,28	1,26	3,67
19	3,42	4499,77	1,28	3,65
20	3,47	4294,58	1,30	3,63
21	3,49	4214,15	1,32	3,62
22	3,51	4134,64	1,34	3,62

23	3,56	3939,78	1,36	3,60
24	3,6	3787,78	1,38	3,58
25	3,62	3713,04	1,40	3,57
26	3,65	3590,29	1,41	3,56
27	3,68	3481,72	1,43	3,54
28	3,71	3374,90	1,45	3,53
29	3,74	3269,80	1,46	3,51
30	3,77	3166,36	1,48	3,50
31	3,80	3064,56	1,49	3,49
32	3,83	2964,35	1,51	3,47
33	3,86	2865,69	1,52	3,46
34	3,89	2768,56	1,53	3,44
35	3,92	2672,91	1,54	3,43
36	3,95	2578,72	1,56	3,41
37	3,98	2485,94	1,57	3,40
38	4,01	2394,55	1,58	3,38
39	4,04	2304,52	1,59	3,36
40	4,07	2215,81	1,60	3,35

Fungsi hubungan antara log intensitas dan log resistansi menurut *datasheet* LDR memiliki fungsi yang linier. Nilai keduanya jika di-log-kan lalu diplot linier dengan bantuan *software* Origin menjadi grafik seperti di bawah ini.



Gambar 16. Hubungan antara log hambatan terhadap log intensitas LDR3.
Hasil kalibrasi LDR 3

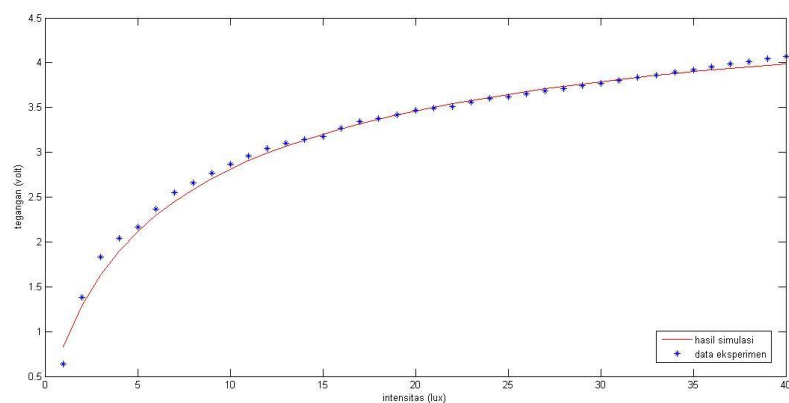
Linear Regression for Data11_B:

$$Y = A + B * X$$

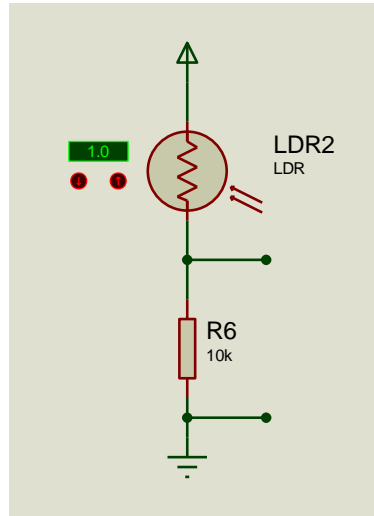
Parameter	Value	Error
A	4,68703	0,01633
B	-0,81426	0,01301

R	SD	N	P
-0,99519	0,03081	40	<0.0001

Fungsi yang dimiliki oleh Gambar 16 setelah dianalisis menggunakan bantuan *software* Origin adalah $\log R = (4,69 \pm 0,02) - ((0,81 \pm 0,01)(\log E))$, dimana E adalah intensitas cahaya. Fungsi tersebut menunjukkan bahwa hasil kalibrasi yang dilakukan telah sesuai dengan *datasheet* LDR yang menyatakan bahwa hubungan log intensitas dan log hambatan mempunyai fungsi linier. Grafik di bawah menunjukkan hubungan antara tegangan keluaran pada rangkaian pembagi tegangan LDR3 dengan intensitas sebagai variabel bebasnya.



Gambar 17. Hubungan tegangan keluaran resistor pada rangkaian pembagi tegangan sensor LDR3 terhadap intensitas cahaya.



Gambar 18. Rangkaian pembagi tegangan

Gambar 13, 15 dan 17 dibuat dengan bantuan *software* Matlab dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$\begin{aligned}\log R_{LDR} &= A + B \log E \\ \log R_{LDR} &= \log 10^A + \log E^B \\ \log R_{LDR} &= \log(10^A E^B) \\ R_{LDR} &= 10^A E^B\end{aligned}\tag{4.1}$$

Persamaan (4.1) disubstitusikan ke persamaan pembagi tegangan :

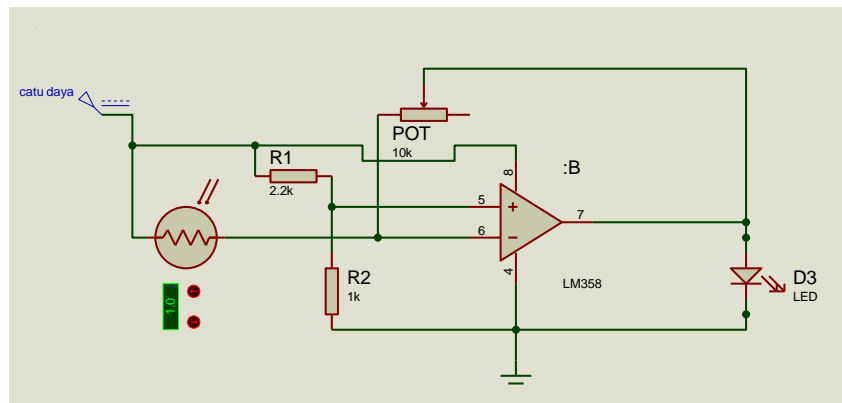
$$\begin{aligned}V_R &= \frac{R}{R + R_{LDR}} V_{in} \\ V_R &= \frac{R}{R + 10^A E^B} V_{in}\end{aligned}\tag{4.2}$$

dimana nilai A dan B diperoleh dari analisis linier data karakterisasi LDR dengan bantuan *software* Origin. nilai A dan B pada grafik 12, 14, dan 16 memiliki nilai yang berbeda untuk setiap LDR yang dianalisis. Gambar 13,

15 dan 17 merupakan hasil plotting dari V_R pada persamaan (4.2) terhadap intensitas.

LDR1 berfungsi sebagai sensor yang dipakai dalam sistem. LDR2 berfungsi memonitor perubahan intensitas cahaya yang terjadi karena perubahan intensitas cahaya matahari. LDR3 berfungsi memonitor perubahan intensitas yang terjadi di bawah lampu baca atau di area tempat baca.

B. Analisis Rancang Bangun Alat

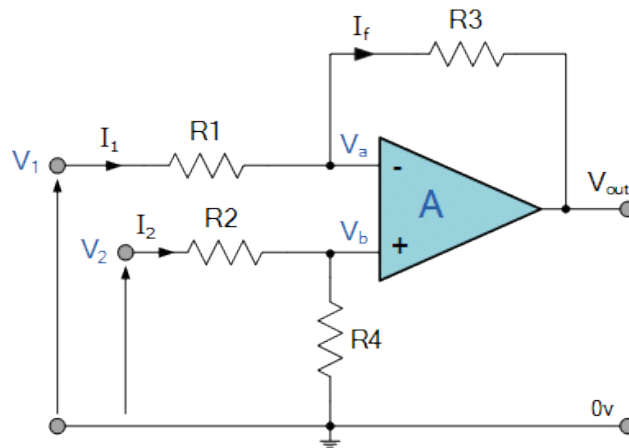


Gambar 19. Rangkaian alat kontrol

Dalam rangkaian kontrol tersebut digunakan sensor LDR yang berfungsi untuk mengukur intensitas cahaya pada tempat baca. Sensor LDR dapat mendeteksi perubahan intensitas cahaya yang diubah menjadi nilai hambatan. Dalam mengubah nilai hambatan menjadi nilai tegangan diperlukan sebuah rangkaian pembagi tegangan. Rancang bangun alat menggunakan rangkaian dasar *differential amplifier*. Hal tersebut dilakukan karena rangkaian tersebut sudah cukup untuk mencapai tujuan awal dari penelitian ini yaitu membuat sistem kontrol intensitas cahaya.

Dalam rangkaian kontrol komponen yang paling utama ialah op-amp sebagai komponen pembanding sekaligus penguat. Rangkaian tersebut dipilih

karena telah sesuai dengan tujuan awal dimana keluaran mampu bersifat linier terhadap perubahan masukan. Rangkaian tersebut memiliki persamaan sebagai berikut :



Gambar 20. Rangkaian penguat selisih

$$I_1 = \frac{V_1 - V_a}{R_1}, I_2 = \frac{V_2 - V_b}{R_2}, I_f = \frac{V_a - (V_{out})}{R_3}, R_1 = R_{LDR}$$

Dalam op-amp dianggap ada ground maya, maka

$$V_a = V_b \text{ dan } V_b = V_2 \left(\frac{R_4}{R_2 + R_4} \right)$$

$$\text{jika } V_2 = 0, \text{ maka } V_{out(a)} = -V_1 \left(\frac{R_3}{R_{LDR}} \right)$$

$$\text{jika } V_1 = 0, \text{ maka } V_{out(b)} = V_2 \left(\frac{R_4}{R_2 + R_4} \right) \left(\frac{R_{LDR} + R_3}{R_{LDR}} \right)$$

$$V_{out} = V_{out(a)} + V_{out(b)} \quad (4.3)$$

Substitusi $V_{out(a)}$ dan $V_{out(b)}$ pada persamaan (4.3) menghasilkan

$$V_{out} = -V_1 \left(\frac{R_3}{R_{LDR}} \right) + V_2 \left(\frac{R_4}{R_2 + R_4} \right) \left(\frac{R_1 + R_3}{R_{LDR}} \right) \quad (4.4)$$

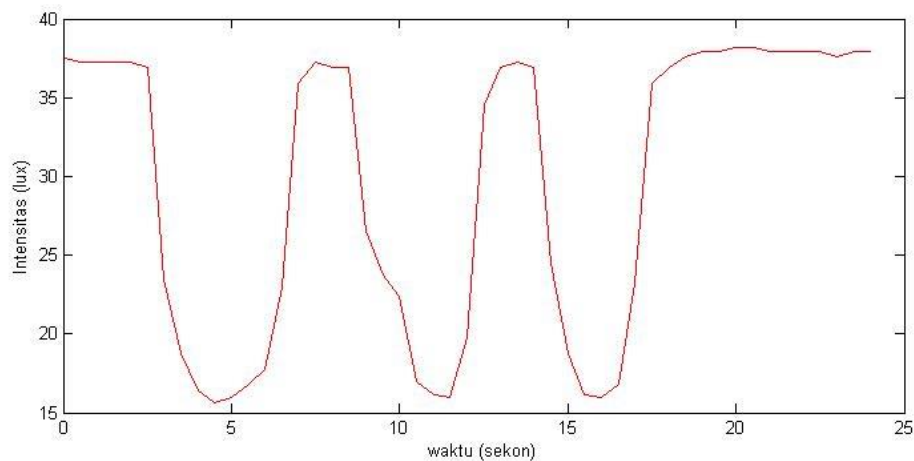
Tabel 5. Hasil pengukuran tegangan keluaran.

LDR2 (ohm)	LDR3 (ohm)	V_a (volt)	V_{out} (volt)
4,14	4	3,76	1,37

4,14	3,99	3,75	1,41
4,14	3,99	3,78	1,4
4,14	3,99	3,77	1,41
4,15	3,99	3,76	1,38
4,14	3,98	3,75	1,43
4,14	3,58	3,78	2,39
4,14	3,41	3,68	2,52
4,15	3,3	3,52	2,56
4,14	3,24	3,47	2,56
4,14	3,27	3,51	2,57
4,15	3,33	3,6	2,55
4,14	3,37	3,64	2,51
4,14	3,56	3,76	2,34
4,14	3,95	3,74	1,5
4,14	3,99	3,77	1,42
4,14	3,98	3,77	1,45
4,15	3,98	3,76	1,45
4,15	3,67	3,74	1,8
4,14	3,59	3,75	2,36
4,15	3,53	3,78	2,44
4,15	3,34	3,58	2,54
4,15	3,28	3,43	2,57
4,14	3,27	3,49	2,54
4,14	3,46	3,74	2,45
4,14	3,91	3,77	1,48
4,14	3,98	3,76	1,39
4,14	3,99	3,75	1,39
4,15	3,98	3,74	1,44
4,14	3,61	3,77	2,36
4,14	3,41	3,7	2,53
4,14	3,28	3,47	2,58
4,14	3,27	3,45	2,56
4,14	3,33	3,56	2,56
4,14	3,57	3,75	2,41
4,14	3,95	3,76	1,5
4,14	3,98	3,75	1,43
4,14	4	3,77	1,37
4,14	4,01	3,76	1,34
4,14	4,01	3,76	1,32

4,14	4,02	3,75	1,34
4,14	4,02	3,77	1,31
4,14	4,01	3,77	1,34
4,14	4,01	3,76	1,34
4,14	4,01	3,75	1,34
4,14	4,01	3,77	1,36
4,14	4	3,78	1,34
4,14	4,01	3,76	1,32
4,14	4,01	3,75	1,32

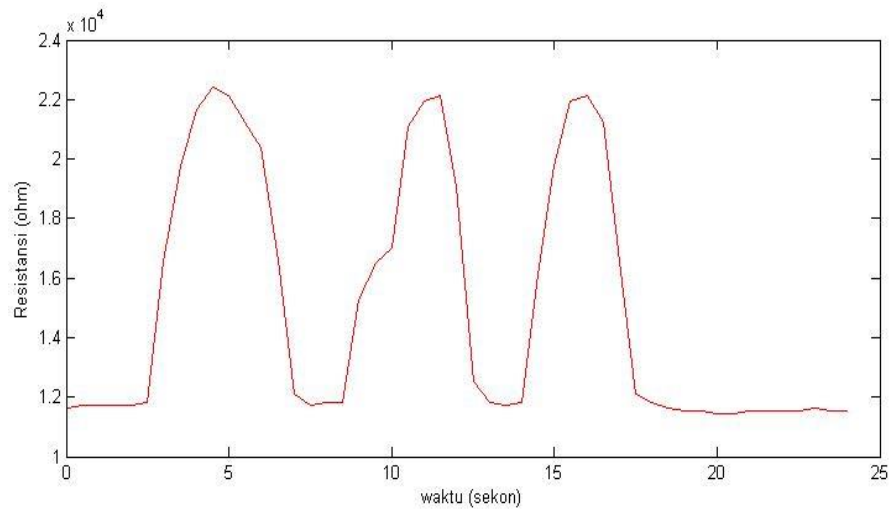
Tabel 5 merupakan hasil pengukuran tegangan menggunakan bantuan Arduino Uno. Kolom 1 adalah data tegangan dari rangkaian pembagi tegangan pada LDR2 yang memonitor perubahan intensitas cahaya matahari. Kolom 2 adalah data tegangan dari rangkaian pembagi tegangan pada LDR3 yang memonitor perubahan intensitas cahaya pada tempat area baca. Kolom 3 adalah data tegangan yang masuk inverter op-amp. Kolom 4 adalah data tegangan output op-amp.



Gambar 21. Grafik perubahan intensitas yang terjadi pada area tempat baca.

Data perubahan intensitas diperoleh dari relasi antara tegangan keluaran pada pembagi tegangan di LDR3 dengan hasil karakterisasi. Data perubahan

intensitas yang diperoleh dari LDR3 dapat digunakan untuk mencari perubahan nilai resistansi pada LDR1 karena kedua LDR tersebut berdekatan dalam penempatannya. Data perubahan intensitas tersebut direlasikan dengan hasil karakterisasi LDR1, sehingga diperoleh perubahan nilai resistansi LDR1.



Gambar 22. Grafik perubahan nilai resistansi yang terjadi pada sensor sistem (LDR1).

C. Analisis State Space

Dalam penelitian ini metode yang digunakan untuk menganalisis sistem adalah metode *state space*. Dalam menganalisis menggunakan metode *state space* terlebih dahulu membuat persamaan yang menggambarkan kerja sistem pada rangkaian. Di persamaan (4.4) telah disinggung perihal persamaan yang dipakai dalam penelitian, yaitu:

$$V_{out} = -V_1 \left(\frac{R_3}{R_{LDR}} \right) + V_2 \left(\frac{R_4}{R_2 + R_4} \right) \left(\frac{R_{LDR} + R_3}{R_{LDR}} \right)$$

dimana R_{LDR} nilainya berubah-ubah setiap waktu ($R_{LDR}(t)$) dan $V_1 = V_2$, sehingga persamaan menjadi :

$$V_{out}(t) = -V_1 \left(\frac{R_3}{R_{LDR}(t)} \right) + V_1 \left(\frac{R_4}{R_2 + R_4} \right) \left(\frac{R_{LDR}(t) + R_3}{R_{LDR}} \right) \quad (4.5)$$

Berikut ini adalah penyederhanaan persamaan (4.5) :

$$\begin{aligned} V_{out}(t) &= - \left(\frac{V_1 R_3}{R_{LDR}(t)} \right) + \left(\frac{V_1 R_4 R_{LDR}(t) + V_1 R_4 R_3}{R_{LDR}(t) \cdot (R_2 + R_4)} \right) \\ V_{out}(t) &= - \left(\frac{V_1 R_3 R_2 + V_1 R_3 R_4}{R_{LDR}(t) \cdot (R_2 + R_4)} \right) + \left(\frac{V_1 R_4 R_{LDR}(t) + V_1 R_4 R_3}{R_{LDR}(t) \cdot (R_2 + R_4)} \right) \\ V_{out}(t) &= \left(\frac{-V_1 R_3 R_2 + V_1 R_4 R_{LDR}(t)}{R_{LDR}(t) \cdot (R_2 + R_4)} \right) \\ V_{out}(t) &= \left(\frac{-V_1 R_3 R_2 + V_1 R_4 R_{LDR}(t)}{(R_2 + R_4)} \right) \left(\frac{1}{R_{LDR}(t)} \right) \end{aligned} \quad (4.6)$$

Pada penelitian ini diketahui $R_2 = 1960 \Omega$, $R_3 = 3800 \Omega$, $R_4 = 980 \Omega$ dan

$V_1 = 12$ volt, sehingga persamaan (4.6) menjadi sebagai berikut :

$$\begin{aligned} V_{out}(t) &= \left(\frac{(-12 \times 3800 \times 1960) + 12 \times 980 R_{LDR}(t)}{(1960 + 980)} \right) \left(\frac{1}{R_{LDR}(t)} \right) \\ V_{out}(t) &= \left(\frac{-89,376 \times 10^6 + 11760 R_{LDR}(t)}{(2940)} \right) \left(\frac{1}{R_{LDR}(t)} \right) \end{aligned} \quad (4.7)$$

Sebelumnya telah diketahui bahwa persamaan *state* adalah sebagai berikut :

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t)$$

$$\frac{\mathbf{x}_{t=1} - \mathbf{x}_{t=0}}{dt} = \mathbf{A}\mathbf{x}_{t=0} + \mathbf{B}\mathbf{u}_{t=0}$$

Karakteristik op-amp ideal yang memiliki waktu tanggapan (*response time*) 0, maka $\dot{\mathbf{x}}(t) = 0$ sehingga persamaan menjadi *state* sebagai berikut

$$\mathbf{0} = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t)$$

$$-\mathbf{A}\mathbf{x}(t) = \mathbf{B}\mathbf{u}(t)$$

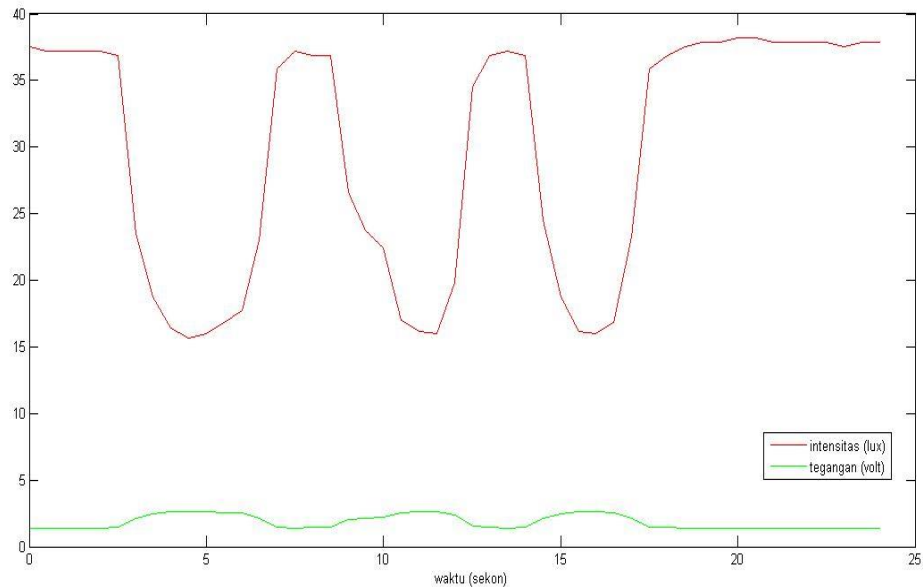
$$\mathbf{x}(t) = -\frac{\mathbf{B}\mathbf{u}(t)}{\mathbf{A}} \quad (4.8)$$

Persamaan (4.7) dan (4.8) adalah persamaan yang identik, maka dapat disimpulkan bahwa $\mathbf{B} = 89,376 \times 10^6 - 11760R_{LDR}(t)$ dan $\mathbf{A} = 2940$ dengan $\mathbf{u}(t)$ sebagai input sistem yang bernilai $\frac{1}{R_{LDR}(t)}$. Nilai \mathbf{A} dan \mathbf{B} mencirikan secara berurutan nilai matriks *state* dan nilai matriks masukan pada sistem yang bekerja. Hal menarik dari penelitian ini bahwa vektor masukan berubah terhadap waktu sedangkan vektor *state* tidak berubah terhadap waktu.

D. Pengujian Alat dan Metode Penelitian

Pengujian alat dilakukan untuk mengetahui apakah intensitas sudah terkontrol sesuai nilai yang diharapkan; nilai yang diharapkan dalam penelitian ini bersifat subjektif. Lampu yang digunakan merupakan lampu LED dengan daya maksimal sekitar 3 watt dan berwarna *warm-white*. Pemilihan lampu LED berwarna *warm-white* karena pada panjang gelombang tersebut mata tidak cepat lelah. Pengujian alat dilakukan pada siang hari sehingga kondisi awal ketika alat dinyalakan lampu LED mati, maka untuk membuktikan bahwa alat tersebut bekerja dengan baik diberikanlah suatu stimulan. Stimulan diberikan dengan cara menutupi LDR1 dan LDR3 dengan tangan, selanjutnya tangan digerakkan pelan-pelan. Gerakan tangan tersebut menimbulkan perubahan nilai tegangan yang dimonitor setiap waktu menggunakan Arduino. Hal tersebut menunjukkan terjadinya perubahan intensitas yang disensor oleh LDR1 dan LDR3. Pengujian dinyatakan berhasil ketika intensitas cahaya pada area tempat baca menurun maka tegangan keluaran akan meningkat, dimana hal tersebut diikuti dengan semakin

terangnya lampu LED dan berlaku sebaliknya. Berikut hasil dari pengujian alat :



Gambar 23. Grafik perubahan intensitas yang terjadi pada area tempat baca yang disensor oleh LDR1 dan LDR3 serta grafik perubahan tegangan keluaran pada sistem.

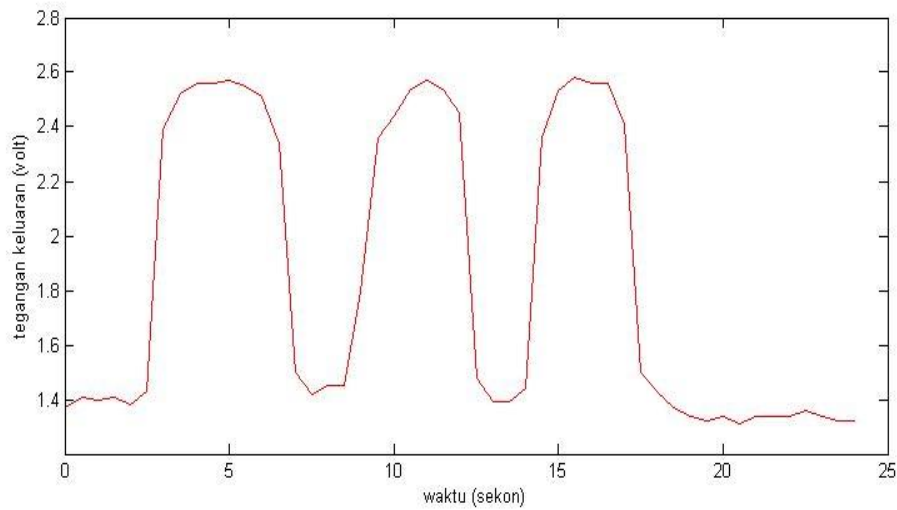
Perubahan tegangan keluaran tersebut mengakibatkan perubahan intensitas lampu LED. Berdasarkan kedua gambar tersebut dapat disimpulkan bahwa ketika perubahan intensitas cahaya pada area tempat baca yang disensor oleh LDR1 dan LDR3 mengalami penurunan, maka diikuti dengan kenaikan tegangan keluaran yang mempengaruhi intensitas cahaya lampu LED yang semakin terang dan berlaku sebaliknya. Hal tersebut membuktikan bahwa alat telah bekerja sesuai dengan tujuan awal penelitian ini.

Setelah pengujian alat selesai selanjutnya menguji metode yang digunakan dalam menganalisis yaitu metode *state space*. Prinsip pengujian ini

ialah membandingkan hasil eksperimen dengan hasil simulasi yang dibantu oleh *software* Matlab.

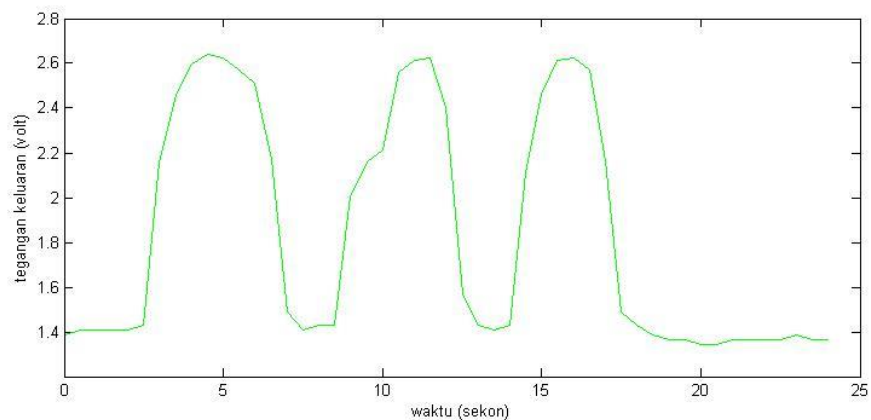
Tabel 6. Data monitoring perubahan tegangan keluaran sistem setiap waktu.

waktu (sekon)	V _{output} (volt)	waktu (sekon)	V _{output} (volt)
0	1,37	12,5	1,48
0,5	1,41	13	1,39
1	1,4	13,5	1,39
1,5	1,41	14	1,44
2	1,38	14,5	2,36
2,5	1,43	15	2,53
3	2,39	15,5	2,58
3,5	2,52	16	2,56
4	2,56	16,5	2,56
4,5	2,56	17	2,41
5	2,57	17,5	1,5
5,5	2,55	18	1,43
6	2,51	18,5	1,37
6,5	2,34	19	1,34
7	1,5	19,5	1,32
7,5	1,42	20	1,34
8	1,45	20,5	1,31
8,5	1,45	21	1,34
9	1,8	21,5	1,34
9,5	2,36	22	1,34
10	2,44	22,5	1,36
10,5	2,54	23	1,34
11	2,57	23,5	1,32
11,5	2,54	24	1,32
12	2,45		

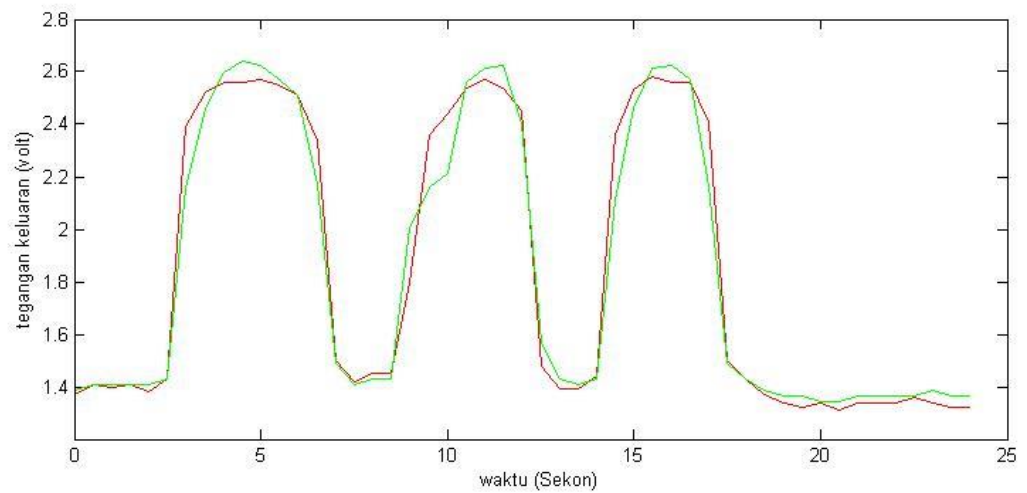


Gambar 24. Grafik data perubahan tegangan keluaran

Dalam penelitian ini masukan sistem ialah perubahan intensitas cahaya yang disensor oleh LDR1. Perubahan intensitas tersebut mengubah nilai resistansi LDR1 setiap waktu. Berdasarkan persamaan dan dengan bantuan *software* Matlab maka grafik perubahan tegangan keluaran yang didapat adalah sebagai berikut :



Gambar 25. Grafik hasil simulasi perubahan tegangan keluaran menggunakan *software* Matlab.



Gambar 26. Grafik gabungan antara hasil eksperimen dan hasil simulasi.

Gambar 26 diperoleh suatu informasi bahwa hasil eksperimen dan hasil simulasi dengan metode *state space* identik. Hal tersebut menandakan bahwa penelitian ini berhasil menerapkan metode *state space* dalam menganalisis sistem pada alat.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

1. Rancang bangun sistem kontrol intensitas cahaya telah diwujudkan dengan fungsi sebagai alat penerangan pada area tempat baca. Sumber cahaya yang dikontrol berupa lampu LED 3 watt warna *warm-white*. Intensitas cahaya sudah terkontrol sesuai nilai yang diharapkan.
2. Sistem kontrol ini merupakan sistem *closed-loop* yang memiliki *input* berupa perubahan resistansi LDR dan tegangan keluaran op-amp sebagai *output*-nya. Intensitas cahaya dari lampu LED diperoleh dengan merelasikan tegangan keluaran op-amp dengan hasil kalibrasi. Hubungan antara *input* dan *output* adalah seperti persamaan berikut :

$$V_{out}(t) = - \left(\frac{89,376 \times 10^6 - 11760 R_{LDR}(t)}{(2940)} \right) \left(\frac{1}{R_{LDR}(t)} \right)$$

Persamaan *state* yang dipakai dalam sistem adalah sebagai berikut

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = - \frac{\mathbf{B}\mathbf{u}(t)}{\mathbf{A}}$$

Berdasarkan kedua persamaan tersebut didapatkan matriks *state*

(\mathbf{A})= **2940**, matriks masukan (\mathbf{B}) = **$89,376 \times 10^6 - 11760 R_{LDR}(t)$**

dan *input* ($\mathbf{u}(t)$) yang bekerja pada sistem bernilai $\frac{1}{R_{LDR}(t)}$.

B. Saran

Pembuatan sistem kontrol intensitas cahaya ini masih memiliki kekurangan yang dapat disempurnakan pada penelitian selanjutnya yang berkaitan, yaitu :

- Penggunaan satu buah lampu LED mengakibatkan *range* pengaturan intensitas cahaya pendek sehingga intensitas cahaya terbatas apabila memerlukan intensitas cahaya yang tinggi. Selain itu penggunaan satu buah lampu LED membuat terbatasnya area tempat baca yang disinari oleh cahaya dari lampu apabila memerlukan area tempat baca yang cukup luas. Untuk itu perlu penyempurnaan sistem alat tersebut seperti penggantian lampu LED dengan lampu LED yang memiliki daya maksimum yang lebih tinggi atau dengan penambahan lampu LED. Penggantian atau penambahan tersebut akan menimbulkan tambahan rangkaian pada alat karena perlu tambahan suplai daya pada sistem. Penambahan rangkaian berdampak pada semakin kompleksnya analisis sistem.

DAFTAR PUSTAKA

- Bierry E., Thimas S., Roland L., Dan P., Manny F. (2014). *Controlling LEDs*. Coppersburg: Lutron Electronics Co., Inc.
- Blackman P.F. (1997). *Introduction to State-variable Analysis*. London: The Macmillan Press Ltd.
- Dorf.R.C., Bishop.R.H. (2011). *Modern Control System 12th Edition*. New Jersey: Pearson Education, Inc.
- Ogata, Katsuhito. (2004). *System Dynamics 4th Edition*. New Jersey: Pearson Education, Inc.
- Ogata, Katsuhito. (2010). *Modern Control Engineering 5th Edition*. New Jersey: Pearson Education, Inc.
- Rieke, George. (2003). *Detection of light*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Sarachik P.E. (2008). *Principles of Liniear System*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Satwiko, Prasastro. (2004). *Fisika Bangunan 1*. Yogyakarta: Andi Press.
- Smith F.G., Terry A.K., Dan W. (2007). *Optics and Photonics*. West Sussex: Wiley.
- Webster.J.G., Areny.R.P. (2001). *Sensor and signl conditioning 2th Edition*. New York: JOHN WILEY & SONS, INC.

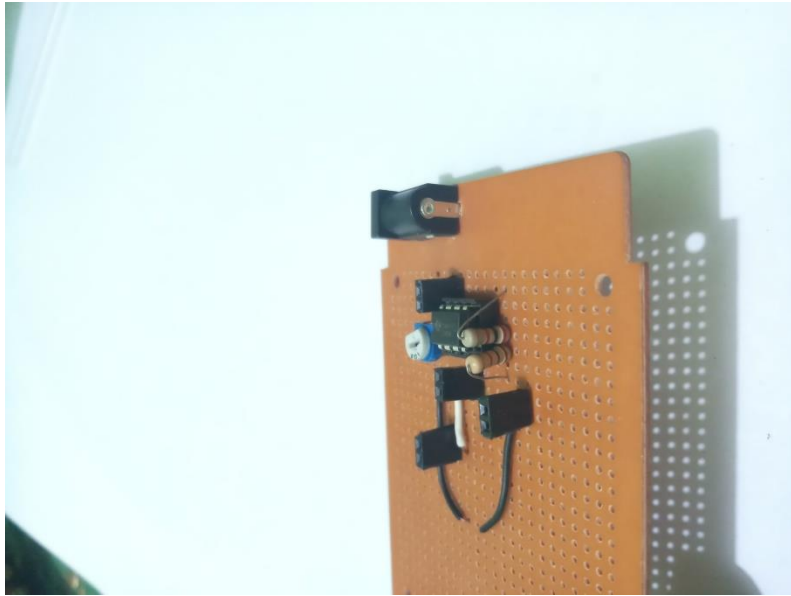
LAMPIRAN

Lampiran 1. Program simulasi state space menggunakan software Matlab

Program di software Matlab:

```
clc
clear all
close all
r=xlsread('coba.xlsx','Sheet1','N2:N50');%      nilai
resistasi pada LDR1 atau R1
dt=0.5;
t=0:dt:(length(v)/2)-0.5;
v1=12;
r2=1960;
r3=3800;
r4=980;
A=2940;
for a=1:length(t)
    u(a)=1/r(a);
    B(a)=(-89.376*10^6)+11760*r(a);
    v11(a)=(B(a)/A)*u(a); %persamaan state
end
plot(t,v11,'g');
```

Lampiran 2. Alat kontrol intensitas cahaya



Lampiran 3. Tempat pengambilan data



Lampiran 4. data pengambilan data siang hari

