

**OTOMATISASI PENGENDALIAN PENCAHAYAAN UNTUK TANAMAN  
SELADA (*Lactuca sativa L.*) DENGAN SISTEM TANAM HIDROPONIK DI  
DALAM *GREENHOUSE***

**SKRIPSI**

Diajukan kepada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam  
Universitas Negeri Yogyakarta  
Untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan Guna Memperoleh Gelar Sarjana S-1 Sains



Oleh

**Dyah Fajar Komala  
NIM. 12306141030**

**PROGRAM STUDI FISIKA  
JURUSAN PENDIDIKAN FISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS NEGERI YOGYAKARTA  
2017**

**PERSETUJUAN**

**TUGAS AKHIR SKRIPSI**

**JUDUL**

**OTOMATISASI PENGENDALIAN PENCAHAYAAN UNTUK TANAMAN  
SELADA (*Lactuca sativa L.*) DENGAN SISTEM TANAM HIDROPONIK DI  
DALAM *GREENHOUSE***

Disusun Oleh:

Nama : Dyah Fajar Komala  
NIM : 12306141030  
Prodi : Fisika

Skripsi ini telah memenuhi persyaratan dan siap diujikan

Disetujui dan disahkan oleh pembimbing pada

Hari : Jum'at

Tanggal : 24 Maret 2017

Untuk dipertahankan di depan tim penguji skripsi  
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam  
Universitas Negeri Yogyakarta

Yogyakarta, 01 Maret 2017  
Menyetujui,  
Dosen Pembimbing Skripsi



**Sumarna, M.Si., M.Eng**  
NIP. 19610308 199101 1 001

## SURAT PERNYATAAN

Yang bertandatangan di bawah ini:

Nama : Dyah Fajar Komala  
NIM : 12306141030  
Jurusan : Pendidikan Fisika  
Program Studi : Fisika  
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam  
Judul Skripsi : Otomatisasi Pengendalian Pencahayaan untuk  
Tanaman Selada (*Lactuca sativa L.*) dengan Sistem  
Tanam Hidroponik di dalam *Greenhouse*.

Menyatakan bahwa skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri dan sepanjang pengetahuan saya tidak berisi materi yang dipublikasikan atau ditulis orang lain sebagai persyaratan menyelesaikan studi di perguruan tinggi lain kecuali pada bagian-bagian tertentu yang saya ambil sebagai acuan atau kutipan dengan mengikuti tata penulisan karya ilmiah yang telah lazim. Apabila terbukti pernyataan ini tidak benar, sepenuhnya menjadi tanggung jawab saya.

Yogyakarta, 24 Maret 2017

Yang menyatakan,



**Dyah Fajar Komala**  
**NIM. 12306141030**

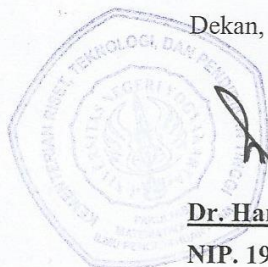
## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi yang berjudul "OTOMATISASI PENGENDALIAN PENCAHAYAAN UNTUK TANAMAN SELADA (*Lactuca sativa L.*) DENGAN SISTEM TANAM HIDROPONIK DI DALAM GREENHOUSE" yang disusun oleh Dyah Fajar Komala, NIM 12306141030 ini telah dipertahankan di depan Dewan Penguji pada tanggal 24-3-2017 dan telah dinyatakan lulus.

### DEWAN PENGUJI

Nama	Jabatan	Tanda Tangan	Tanggal
<u>Sumarna, M.Si, M.Eng</u> NIP.19610308 199101 1 001	Ketua Penguji		4/4-2017
<u>Nur Kadarisman, M.Si</u> NIP.19640205 199101 1 001	Sekretaris Penguji		4-4-2017
<u>Agus Purwanto, M.Sc</u> NIP.19650813 199512 1 001	Penguji Utama		4-4-2017

Yogyakarta, 11-4-2017  
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam  
Dekan,



Dr. Hartono  
NIP. 19620329 198702 1 002

## MOTTO

**“Sesungguhnya Allah melaksanakan urusan yang (dikehendaki)Nya. Sesungguhnya Allah telah mengadakan ketentuan bagi tiap-tiap sesuatu”.**

**(QS. At-Tholaq : 3).**

**“Hasbunallah wani'mal wakiil, ni'mal maula wa ni'man nashir”**

**“Cukuplah Allah menjadi Penolong kami dan Allah adalah sebaik-baik pelindung”.**

**“Seorang mukmin yang kuat lebih baik dan lebih dicintai oleh Allah daripada seorang mukmin yang lemah, dan semuanya ada kebaikan. Semangatlah untuk meraih apa yang bermanfaat bagimu dan mintalah pertolongan Allah dan jangan lemah”.**

**(Sabda Rasulullah)**

**“Hidup di dunia hanya sebentar, manfaatkan waktu untuk beribadah dan buatlah kebahagiaan disetiap waktu”.**

## HALAMAN PERSEMBAHAN

### **Bismillaahirrahmaanirrahiim**

Karya ini dipersembahkan kepada:

- ❖ Ayah Bapak dan Bunda Ibu tercinta yang selalu memberi semangat, motivasi dan kasih sayangnya selama ini dan menjadi donatur terbesar dalam kehidupan saya (Rochmadi dan Sukiyani) 😊
- ❖ Kakak dan adik-adik tersayang (Sheranisa Mustika, Tamara Fitria Nanda, Hazim Rafi Rachmadani dan Dzakiyah Nuranisa).
- ❖ Keluarga besar Ahmad Dahlan dan Mentowiryo serta keluarga Om Mansur dan Bude Asih yang selalu memberi bantuan dan dukungannya.
- ❖ Teman-teman seperjuangan selama kuliah yang selalu memberi bantuan dan motivasinya (Udin, Sri, Husnul, Hilma).
- ❖ Teman-teman 7 Pendekar dari awal kuliah hingga akhir kuliah \*love\* (Edar, Indri, Viky, Nila, Mela).
- ❖ Teman-teman Fisika-B 2012 UNY (Yoradab) yang selalu memberi bantuan, motivasi dan semangat.
- ❖ Teman-teman KKN 1066 (Shanty, Fendi, Danang, Candra, Nanda, Btara, Ayu, Ipeh, Jefri).
- ❖ Teman-teman SMA terbaik (Ayu, Lita, Inayah, Welvi, Ria, Erny, Syifa).
- ❖ Teman-teman Rampoe UGM (Tim Diplomasi Taiwan, Adik Asih Laraswati, dan semua anggota).
- ❖ Teman-teman Happy Bee (Om Singgih, Om Alex, Mba Rori, Asih, Petrik, Niko, Mba Ery, Haby dll).
- ❖ Teman-teman Kost Perkutut.

**OTOMATISASI PENGENDALIAN PENCAHAYAAN UNTUK TANAMAN SELADA (*Lactuca sativa L.*) DENGAN SISTEM TANAM HIDROPONIK DI DALAM GREENHOUSE**

Oleh

**Dyah Fajar Komala**

**12306141030**

**ABSTRAK**

Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membuat sebuah alat kontrol intensitas cahaya otomatis untuk tanaman selada dengan sistem tanam hidroponik di dalam *greenhouse* berukuran (61 x 50 x 52) cm<sup>3</sup> sesuai dengan nilai *set point*, yaitu pada nilai 25 lx, menganalisis sistem kontrol dari fungsi transfer yang diperoleh, dan mengetahui pengaruh kontrol intensitas cahaya terhadap pertumbuhan tanaman selada di dalam *greenhouse*.

Sensor fotodiode dalam penelitian ini digunakan untuk mendeteksi intensitas cahaya. Rangkaian yang digunakan adalah *Transimpedance Amplifier* (TIA) yang dapat menguatkan arus yang dihasilkan fotodiode ketika menerima cahaya dan mengubahnya menjadi keluaran tegangan yang kemudian dibandingkan dengan nilai *set point* oleh mikrokontroler Arduino. Pengontrolan dilakukan secara *closed-loop* menggunakan saklar transistor dan *relay* untuk mengatur lampu LED dalam keadaan *on* atau *off*. LED digunakan sebagai *supplemental lighting* karena LED lebih aman, mudah dioperasikan, murah dan lebih hemat energi.

Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa sistem kontrol yang telah dibuat mampu bekerja sesuai dengan *set point* yang ditentukan, yaitu pada tegangan 2 V atau setara dengan intensitas sebesar 25 lx. Tanaman selada yang dikontrol mengalami pertumbuhan lebih baik daripada yang tidak dikontrol, yaitu selada memiliki daun sebanyak 7-11 helai dengan ukuran rata-rata 5 cm dan berwarna hijau-kekuningan.

Kata Kunci: *Sistem kontrol, intensitas cahaya, fotodiode, LED, tanaman selada.*

**LIGHTING CONTROL AUTOMATIZATION FOR LETTUCE  
(*Lactuca sativa L.*) WITH HYDROPONIC SYSTEM IN GREENHOUSE**

**By:**

**Dyah Fajar Komala**

**12306141030**

**ABSTRACT**

This research aimed to design and make an automatic control device of light intensity for lettuce with hydroponic system in greenhouse with size (61 x 50 x 52) cm<sup>3</sup> based on its set point, that was 25 lx, to analyze control system from transfer function, and to determine the influence of light intensity control to growth lettuce in greenhouse.

In this research, photodiode was used as a sensor to detect light intensity. The circuit used was Transimpedance Amplifier (TIA) that amplified photodiode current when it received light and converted it into voltage; then the voltage was compared to the set point by Arduino microcontroller. The controlling process worked with closed-loop using transistor switch and relay to turn LED on or turn LED off. LEDs were used as supplemental lighting because LEDs are more secure, easy to operate, cheaper and more efficient.

The result of this research showed that the control system that had been created was able to work in accordance to a specified set point, which was at a voltage of 2 V or equivalent to an intensity of 25 lx. Lettuces that were controlled grew better than the ones that were not; each lettuce has about 7-11 leaves with average size of 5 cm and green-yellowish leaves.

Keywords: control system, light intensity, photodiode, LED, lettuce.

## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT yang senantiasa melimpahkan nikmat dan rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir Skripsi (TAS) yang berjudul **”OTOMATISASI PENGENDALIAN PENCAHAYAAN UNTUK TANAMAN SELADA (*Lactuca sativa L.*) DENGAN SISTEM TANAM HIDROPONIK DI DALAM GREENHOUSE”**.

Penyusunan skripsi ini diajukan sebagai salah satu syarat menyelesaikan studi untuk memperoleh gelar Sarjana Sains pada program studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Yogyakarta. Penelitian dan penyusunan skripsi ini tidak dapat berjalan dengan baik tanpa adanya dukungan dan dorongan semangat dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan ucapan terimakasih kepada:

1. Bapak Dr. Hartono, selaku Dekan FMIPA UNY yang telah memberikan izin atas penyusunan skripsi ini.
2. Bapak Yusman Wiyatmo, M.Si., selaku Ketua Jurusan Pendidikan Fisika FMIPA UNY yang telah memberikan izin penelitian ini.
3. Bapak Nur Kadarisman, M.Si., selaku Koordinator Program Studi Fisika yang telah memberikan izin penelitian ini.
4. Bapak Sumarna, M.Si., M.Eng., selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan dalam penyusunan skripsi ini.

5. Bapak Sugiyanto selaku laboran Laboratorium Elektronika dan Instrumentasi FMIPA UNY yang telah bekerja sama selama penulis melakukan penelitian ini.
6. Dosen-dosen Jurusan Pendidikan Fisika FMIPA UNY yang telah memberikan banyak ilmu pengetahuan kepada penulis.
7. Teman-teman Fisika B 2012 yang telah berbagi banyak pengalaman dan memberikan motivasi.
8. Semua pihak yang telah membantu penulis yang tidak dapat penulis sebutkan satu-persatu.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penyusunan skripsi ini. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun untuk perbaikan penelitian selanjutnya. Semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi setiap pembaca.

Yogyakarta, 24 Maret 2017

Penulis,



**Dyah Fajar Komala**

**NIM. 12306141030**

## DAFTAR ISI

	Halaman
JUDUL .....	i
PERSETUJUAN .....	ii
SURAT PERNYATAAN.....	iii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iv
MOTTO .....	v
HALAMAN PERSEMBAHAN .....	vi
ABSTRAK .....	vii
ABSTRACK .....	viii
KATA PENGANTAR .....	ix
DAFTAR ISI .....	xi
DAFTAR GAMBAR .....	xv
DAFTAR TABEL.....	xix
DAFTAR LAMPIRAN .....	xx
BAB I PENDAHULUAN .....	1
A. Latar Belakang .....	1
B. Identifikasi Masalah .....	5
C. Batasan Masalah .....	6
D. Rumusan Masalah .....	6
E. Tujuan Penelitian .....	7
F. Manfaat Penelitian .....	7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....	9
A. Tanaman Selada ( <i>Lactuca sativa L.</i> ) .....	9
B. Hidroponik .....	10
C. <i>Greenhouse</i> .....	11

D. Cahaya .....	13
1. Cahaya Matahari .....	13
a. Karakteristik Pencahayaan .....	14
2. Satuan Untuk Cahaya .....	17
E. Sistem Kontrol .....	18
1. Fungsi Transfer .....	18
2. Diagram Blok .....	19
3. Kontrol Otomatis .....	21
4. Transformasi Laplace .....	22
5. Rangkaian Sensor .....	25
a. Sensor Fotodioda .....	25
b. Rangkaian <i>Transimpedance Amplifier</i> (TIA) .....	28
6. Mikrokontroler Arduino .....	31
a. Pengertian Arduino .....	31
b. <i>SD Card</i> .....	33
7. Transistor .....	33
8. <i>Relay</i> .....	34
9. <i>Light Emitting Diode</i> (LED) .....	37
10. <i>Driver</i> LED .....	39
11. Sistem Pengukuran (Kalibrasi) .....	40
BAB III METODE PENELITIAN.....	42
A. Waktu dan Tempat Penelitian .....	42
C. Alat dan Bahan Penelitian .....	43
D. Program Analisis .....	44

E. Teknik Pengambilan Data .....	44
1. Tahap Rancang Bangun Alat .....	44
a. Perancangan Disain Alat dan <i>Greenhouse</i> .....	44
b. Perancangan Rangkaian Sistem Kontrol Intensitas Cahaya .....	47
2. Tahap Pengujian Alat .....	50
a. Pengujian Sensor Fotodiode .....	51
b. Pengujian Rangkaian Sistem Kontrol .....	51
F. Teknik Analisis Data .....	52
G. Diagram Alir Tahapan Penelitian.....	53
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....	54
A. Karakteristik Fotodiode.....	54
B. Analisis Rancang Bangun Alat .....	56
1. Blok Rangkaian Sensor Fotodiode .....	56
2. Blok Mikrokontroler Arduino .....	59
3. Blok Saklar Transistor .....	60
4. Blok <i>Relay</i> .....	62
5. Blok Lampu LED .....	63
6. Blok Proses Pengontrolan Intensitas Cahaya .....	64
C. Fungsi Transfer Total .....	65
D. Pengujian Alat .....	67
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	72
A. Kesimpulan.....	72
B. Saran.....	73

DAFTAR PUSTAKA .....	74
LAMPIRAN .....	77

## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1. Spektrum cahaya matahari dan satuannya .....	16
Gambar 2. Spektrum absorpsi klorofil .....	17
Gambar 3. Diagram blok sistem kontrol <i>closed-loop</i> dengan elemen umpan balik.....	19
Gambar 4. (a) Diagram blok kontroler <i>on-off</i>  (b) Diagram blok kontroler <i>on-off</i> dengan <i>differential gap</i> .....	22
Gambar 5. Cara kerja fotodiode .....	25
Gambar 6. (a) Mode fotovoltai fotodiode  (b) Mode fotokonduktif fotodiode.....	27
Gambar 7. Fotodiode dengan sebuah resistor pengubah arus ke tegangan.....	27
Gambar 8. Fotodiode dengan <i>op-amp</i> penguat <i>inverting</i> arus ke tegangan....	28
Gambar 9. Rangkaian <i>Transimpedance Amplifier</i> (TIA) ideal .....	28
Gambar 10. <i>Op-amp</i> UA741 .....	29
Gambar 11. Aliran arus yang mengalir di dalam rangkaian pengondisi sinyal fotodiode.....	30

Gambar 12. Arduino UNO.....	32
Gambar 13. Modul <i>SD Card</i> Arduino.....	33
Gambar 14. Rangkaian saklar transistor .....	35
Gambar 15. Penggunaan dioda dengan kumparan <i>relay</i> .....	36
Gambar 16. <i>High Power LED</i> 3 watt dan PCB aluminium.....	39
Gambar 17. <i>Driver LED</i> .....	40
Gambar 18. Disain alat penelitian.....	45
Gambar 19. Konstruksi <i>Greenhouse</i> .....	45
Gambar 20. Rangkaian sensor fotodioda .....	48
Gambar 21. Diagram alir program Arduino.....	49
Gambar 22. Diagram blok sistem kontrol intensitas cahaya.....	50
Gambar 23. Rangkaian pengujian sensitivitas sensor fotodioda.....	51
Gambar 24. Diagram Alir Penelitian .....	53
Gambar 25. Hubungan intensitas cahaya terhadap tegangan keluaran rangkaian sensor fotodioda.....	55
Gambar 26. Diagram blok rangkaian sensor fotodioda .....	56

Gambar 27. Hasil pengujian tegangan keluaran rangkaian sensor sebagai fungsi waktu.....	57
Gambar 28. Diagram blok mikrokontroler Arduino .....	60
Gambar 29. Diagram blok saklar transistor .....	61
Gambar 30. Rangkaian <i>driver relay</i> .....	62
Gambar 31. Diagram blok <i>relay</i> .....	63
Gambar 32. Diagram blok lampu LED .....	64
Gambar 33. Diagram blok konversi tegangan ke intensitas cahaya .....	65
Gambar 34. Diagram blok sistem kontrol intensitas cahaya untuk tanaman selada di dalam <i>greenhouse</i> . .....	65
Gambar 35. Diagram blok hasil penggabungan 1 .....	66
Gambar 36. Diagram blok hasil penggabungan 2.....	66
Gambar 37. Diagram blok total.....	66
Gambar 38. Grafik fluktuasi intensitas cahaya yang diwakili nilai tegangan di dalam <i>greenhouse</i> tanpa kontrol intensitas cahaya.....	68

Gambar 39. Grafik intensitas cahaya di dalam *greenhouse* ketika adanya kontrol

intensitas cahaya..... 69

Gambar 40. (a). Tanaman selada di dalam *greenhouse* yang dikontrol

(b). Tanaman selada di dalam *greenhouse* yang tidak dikontrol 70

## DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 1. Perbandingan antara lampu <i>High Pressure Sodium (HPS)</i> , <i>Metal Halide</i> dan <i>Light Emitting Diode (LED)</i> .....	3
Tabel 2. Aturan penyederhanaan diagram blok .....	21
Tabel 3. Tabel Transformasi Laplace .....	24
Tabel 4. Hasil pengujian karakteristik transistor .....	60
Tabel 5. Perbandingan hasil tanaman selada dari ketiga <i>greenhouse</i> yang diteliti.....	71

## DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran 1. Data tegangan keluaran sensor terhadap perubahan intensitas cahaya .....	78
Lampiran 2. Data fluktuasi intensitas cahaya di dalam <i>greenhouse</i> tanpa alat kontrol .....	79
Lampiran 3. Data fluktuasi intensitas cahaya di dalam <i>greenhouse</i> setelah dikontrol .....	82
Lampiran 4. Data respon waktu terhadap kenaikan intensitas cahaya .....	107
Lampiran 5. Program Arduino untuk mengaktifkan <i>relay</i> rangkaian lampu LED .....	108
Lampiran 6. Tanaman selada setelah proses pembibitan dan siap dimasukkan ke dalam <i>greenhouse</i> .....	112
Lampiran 7. Hasil tanaman selada tanpa alat kontrol intensitas cahaya .....	113
Lampiran 8. Hasil tanaman selada yang dikontrol intensitas cahayanya .....	113

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **A. Latar Belakang**

Selada merupakan salah satu jenis tanaman yang menjadi prioritas bahan pangan masyarakat. Selada mudah ditemukan dan sering dibudidayakan. Daun tanaman selada memiliki banyak kandungan vitamin dan mineral, seperti vitamin A dan C yang baik untuk fungsi penglihatan dan tulang. Tanaman selada banyak dimanfaatkan sebagai salad.

Dalam pertumbuhannya, selada dipengaruhi berbagai faktor seperti faktor genetik dan lingkungan. Lingkungan yang sesuai dengan kebutuhan tanaman selada dapat mendukung pertumbuhan selada dengan baik, seperti suhu, kelembapan udara dan cahayanya. Selain itu, ketersediaan unsur hara juga merupakan salah satu faktor penting. Faktor-faktor yang mendukung dapat meningkatkan kualitas tanaman selada dan nilai jualnya menjadi tinggi. Kualitas tanaman yang baik dapat mempengaruhi kesejahteraan hidup masyarakat, yaitu perkembangan gizi masyarakat, peningkatan ekspor maupun peningkatan pendapatan masyarakat, khususnya masyarakat kecil seperti petani.

Kualitas bahan pangan seperti selada dapat diperoleh dengan proses ketersediaan pangan, misalnya dengan bercocok tanam. Dalam bercocok tanam diperlukan lingkungan yang mendukung untuk proses pertumbuhan tanaman. *Greenhouse* merupakan salah satu solusi di mana lingkungan yang lebih bersih, suhu dan kelembapan serta kebutuhan cahaya yang secara langsung dapat

diperoleh dan dikendalikan menggunakan teknologi yang diatur sesuai dengan kebutuhan tanaman untuk meningkatkan proses fotosintesis.

Fotosintesis adalah suatu proses biokimia yang dilakukan tanaman di mana karbohidrat disintesis dari karbondioksida dan air dengan menggunakan cahaya sebagai sumber energinya. Pada dasarnya fotosintesis adalah sebuah reaksi transfer energi. Karbohidrat merupakan sumber energi yang disimpan dalam tanaman dan dapat disebarkan ke akar tanaman, buah atau ke bagian manapun dalam tanaman yang mengalami pertumbuhan (Brown, <https://www.croptking.com/blog/light-greenhouse-how-much-enough>). Tanpa adanya cahaya yang cukup, proses fotosintesis akan terhambat dan mempengaruhi pertumbuhan dan perkembangan tanaman.




Namun pada saat ini, meningkatnya pembangunan yang terjadi di daerah perkotaan dan kegiatan industri yang semakin banyak dilakukan menyebabkan terbatasnya ketersediaan lahan untuk bercocok tanam dan juga kualitas udara menjadi semakin memburuk. Selain itu, industrialisasi dan pola hidup konsumtif juga mengakibatkan peristiwa *global warming*, sehingga saat ini musim menjadi tidak menentu. Musim yang tidak menentu dapat mempengaruhi pertumbuhan tanaman karena kebutuhan cahaya yang diterima tidak stabil sehingga dapat memperlambat waktu panen.

Sistem tanam hidroponik menjadi salah satu solusi akibat terbatasnya ketersediaan lahan. Sistem tanam hidroponik menggunakan air sebagai media tanamnya dengan menambahkan unsur hara sesuai dengan kebutuhan tanaman sehingga kegiatan bercocok tanam dapat dilakukan walaupun di lahan yang

sempit dan di lingkungan perkotaan. Pada penelitian ini digunakan sistem *wick* (sumbu) karena sistem ini sangat sederhana dan tidak menggunakan listrik.

Tanaman yang mengalami kekurangan cahaya untuk fotosintesis dapat dibantu dengan pencahayaan tambahan (*supplemental lighting*). Pencahayaan tambahan (*supplemental lighting*) sangat bermanfaat ketika musim penghujan tiba, sehingga tanaman tetap dapat memperoleh cahaya untuk melakukan fotosintesis. Terdapat berbagai jenis *supplemental lighting*, yaitu lampu *High Pressure Sodium (HPS)*, *Metal Halide* dan *Light Emitting Diode (LED)*. Berikut adalah perbandingan dari ketiga lampu tersebut:

Tabel 1. Perbandingan antara lampu *High Pressure Sodium (HPS)*, *Metal Halide* dan *Light Emitting Diode (LED)* (Hernandez, 2012) dan (Noer, 2015)

<i>High Pressure Sodium (HPS)</i> 	<i>Metal Halide</i> 	<i>Light Emitting Diode (LED)</i> 
Gas yang digunakan adalah sodium dalam keadaan tereksitasi untuk menghasilkan cahaya	Gas yang digunakan adalah merkuri, argon dan garam <i>metal-halide</i>	Tidak mengandung gas berbahaya karena <i>solid state</i> yang terbuat dari bahan semikonduktor
Konsumsi energi tinggi dan menghasilkan panas	Konsumsi energi tinggi dan menghasilkan panas	Konsumsi energi rendah dan beroperasi pada suhu rendah
Distribusi cahayanya menyebar	Distribusi cahayanya menyebar	Distribusi cahayanya lebih sempit
Waktu hidupnya sekitar 24.000 jam	Waktu hidupnya sekitar 18.000 jam	Waktu hidupnya sekitar (25.000-200.000) jam

Dari ketiga jenis lampu tersebut, maka lampu LED adalah jenis lampu yang lebih aman dan efisien dibanding dengan jenis lampu lainnya. Distribusi

cahaya pada LED lebih sempit dan terarah sehingga tidak membutuhkan reflektor untuk memfokuskan cahaya pada daerah tertentu. LED menghasilkan spektrum warna yang selektif dengan intensitas yang tinggi, namun tidak menghasilkan panas sehingga dapat diletakkan dekat dengan tanaman dan tidak mempengaruhi suhu tanaman.

Dengan perkembangan teknologi yang semakin maju dan pesat, berbagai permasalahan dapat diminimalisir. LED merupakan salah satu teknologi yang sedang berkembang pesat saat ini. Penggunaan lampu tradisional seperti HPS dan *Metal Halide* sudah mulai digantikan dengan teknologi LED. Konsumsi energi LED yang rendah dan efektif dapat dimanfaatkan untuk menambah efisiensi energi.

Dalam kehidupan sehari-hari terdapat sejumlah tujuan yang harus dicapai. Misalnya, dalam bidang rumah tangga, kita perlu mengatur suhu dan kelembapan rumah dan bangunan untuk kenyamanan hidup. Namun, agar pemakaian energi lebih efisien diperlukan cara terbaik untuk mencapai hal tersebut. Cara untuk mencapai tujuan ini biasanya melibatkan penggunaan sistem kontrol yang melaksanakan strategi kontrol tertentu. Kontrol otomatis (otomatis) telah memegang peranan yang sangat penting dalam perkembangan ilmu dan teknologi (Rokim, 2008: 169).

Karena kemajuan dalam teori dan praktek kontrol otomatis memberikan kemudahan dalam mendapatkan performansi dari sistem dinamik, mempertinggi kualitas dan menurunkan biaya produksi, mempertinggi laju produksi, meniadakan pekerjaan-pekerjaan rutin dan membosankan yang harus dilakukan

oleh manusia, dan sebagainya, maka sebagian besar insinyur dan ilmuwan sekarang harus mempunyai pemahaman yang baik dalam bidang ini (Rokim, 2008: 169).

Istilah sistem kontrol otomatis didefinisikan sebagai sistem kontrol yang mempunyai umpan balik dengan acuan masukan atau keluaran yang dikehendaki dapat konstan atau berubah secara perlahan dengan berjalannya waktu, mempunyai tugas utama yaitu menjaga keluaran sebenarnya berada pada nilai yang dikehendaki dengan adanya gangguan. Ada banyak contoh sistem kontrol otomatis, salah satu di antaranya adalah kontrol suhu ruangan mobil secara otomatis (Rokim, 2008: 173).

Salah satu sistem kontrol otomatis adalah sistem kontrol *on-off* yang mudah dibuat dan mampu menjadi sebuah sistem yang mengendalikan keadaan sesuai dengan kebutuhan dan dapat mengurangi permasalahan yang ada. Oleh karena itu, dibuatlah suatu sistem kontrol yang dapat bekerja secara otomatis untuk pengendalian intensitas cahaya tanaman selada dengan sistem tanam hidroponik di dalam *greenhouse* dengan bantuan cahaya dari lampu LED.

## **B. Identifikasi Masalah**

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan di atas, maka dapat diidentifikasi permasalahan sebagai berikut:

1. Kebutuhan cahaya yang diterima tanaman selada tidak stabil yang disebabkan industrialisasi dan musim yang tidak menentu sehingga dapat mempengaruhi pertumbuhan dan waktu panen selada.

2. Perlunya dibuat sebuah sistem secara otomatis yang dapat mengendalikan kebutuhan cahaya tanaman untuk meningkatkan pertumbuhannya ketika cahaya yang diterima tanaman jumlahnya sedikit.

### **C. Batasan Masalah**

Dalam penelitian ini cakupan masalah yang diteliti dibatasi pada pengendalian fluktuasi intensitas cahaya terhadap tanaman selada dengan sistem tanam hidroponik (*wick system*) di dalam *greenhouse* berukuran (61x50x52) cm<sup>3</sup> berbahan plastik dengan atap diberi filter mika berwarna biru dan diasumsikan suhu serta kelembapan udara di dalam *greenhouse* nilainya sama untuk semua *greenhouse* yang diteliti. *Greenhouse* terletak di luar ruangan di mana cahaya yang masuk ke dalam *greenhouse* berasal dari cahaya apapun. LED jenis HPL berwarna biru dengan *range* panjang gelombang sekitar (440-480) nm digunakan untuk memenuhi kebutuhan cahaya yang diterima tanaman selada di dalam *greenhouse*, apabila intensitas cahaya yang dideteksi di dalam *greenhouse* nilainya di bawah nilai *set point* yang ditentukan, yaitu 25 lux.

### **D. Rumusan Masalah**

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan sebelumnya, maka dapat dirumuskan permasalahan dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana rancang bangun sebuah sistem kontrol intensitas cahaya secara otomatis untuk tanaman selada dengan sistem tanam hidroponik di dalam *greenhouse*?
2. Bagaimana analisis fungsi transfer sistem kontrol intensitas cahaya otomatis untuk tanaman selada dengan sistem tanam hidroponik di dalam *greenhouse* tersebut?
3. Apakah kontrol intensitas cahaya berpengaruh terhadap pertumbuhan tanaman selada dengan sistem tanam hidroponik di dalam *greenhouse*?

#### **E. Tujuan Penelitian**

Berdasarkan rumusan masalah yang telah diuraikan di atas, maka tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Merancang dan membuat sebuah alat kontrol intensitas cahaya otomatis di dalam *greenhouse* sesuai dengan nilai *set point*.
2. Menganalisis sistem kontrol intensitas cahaya untuk tanaman selada dengan sistem tanam hidroponik di dalam *greenhouse* dengan fungsi transfer.
3. Mengetahui pengaruh kontrol intensitas cahaya terhadap pertumbuhan tanaman selada dengan sistem hidroponik di dalam *greenhouse*.

#### **F. Manfaat Penelitian**

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat antara lain untuk memperoleh pengetahuan serta pemahaman mengenai fungsi transfer berdasarkan

diagram blok dari setiap komponennya, sehingga dapat mengetahui karakteristik system. Sistem yang dibuat dapat menjadi alat kontrol intensitas cahaya tanaman selada yang efisien untuk penggunaan di dalam *greenhouse* dan sebagai alat yang dapat digunakan untuk pengoptimalan hasil tanaman.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **A. Tanaman Selada (*Lactuca sativa L.*)**

Selada merupakan tanaman yang berasal dari negara beriklim sedang. Tanaman selada sudah dibudidayakan sejak 500 tahun sebelum masehi. Komoditas hortikultura berperan penting terhadap perkembangan gizi masyarakat, peningkatan pendapatan petani, perluasan kesempatan kerja, pengembangan agribisnis dan agroindustri, peningkatan ekspor dan pengurangan impor. Nilai ekonomi selada cukup tinggi sehingga tanaman ini menjadi salah satu tanaman prioritas nasional untuk mendukung perkembangan pangan di Indonesia (Rukmana, 1994).

Selada tumbuh baik di dataran tinggi (pegunungan). Di dataran rendah daunnya kecil-kecil dan cepat berbunga. Pertumbuhan optimal pada tanah yang subur banyak mengandung humus, mengandung pasir atau lumpur. Suhu yang optimal untuk tumbuhnya antara (15-20)°C, pH tanah antara (5-6,5). Waktu tanam terbaik adalah pada akhir musim hujan. Walaupun demikian, selada dapat pula ditanam pada musim kemarau dengan pengairan atau penyiraman yang cukup (BPTP Yogyakarta, 2011).

Suhu sedang adalah hal yang ideal untuk produksi selada berkualitas tinggi; suhu optimumnya untuk siang hari adalah 20°C dan malam hari adalah 10°C. Suhu yang lebih tinggi dari 30°C biasanya menghambat pertumbuhan. Umumnya intensitas cahaya tinggi dan hari panjang meningkatkan laju pertumbuhan, dan mempercepat perkembangan luas daun sehingga daun menjadi

lebih lebar, yang berakibat pembentukan kepala menjadi lebih cepat (Rubatzky, 1999).

## **B. Hidroponik**

Istilah hidroponik yang berasal dari bahasa Latin yang berarti *hydro* (air) dan *ponos* (kerja). Istilah hidroponik pertama kali dikemukakan oleh W.F. Gericke dari University of California pada awal tahun 1930-an, yang melakukan percobaan hara tanaman dalam skala komersial yang selanjutnya disebut *nutrikultur* atau *hydroponics*. Selanjutnya hidroponik didefinisikan secara ilmiah sebagai suatu cara budidaya tanaman tanpa menggunakan tanah, akan tetapi menggunakan media *inert* seperti *gravel*, pasir, *peat*, *vermikulit*, *pumice* atau *sawdust*, yang diberikan larutan hara yang mengandung semua elemen esensial yang diperlukan untuk pertumbuhan dan perkembangan normal tanaman (Resh, 1998).

Budidaya tanaman secara hidroponik memiliki beberapa keuntungan dibandingkan dengan budidaya secara konvensional, yaitu pertumbuhan tanaman dapat dikontrol, tanaman dapat berproduksi dengan kualitas dan kuantitas yang tinggi, tanaman jarang terserang hama penyakit karena terlindungi, pemberian air irigasi dan larutan hara lebih efisien dan efektif, dapat diusahakan terus-menerus tanpa tergantung oleh musim, dan dapat diterapkan pada lahan yang sempit (Harris, 1988).

Menurut Susila (2013: 3), berdasarkan penggunaan media atau substratnya hidroponik dikelompokkan menjadi dua, yaitu *Substrate System* dan *Bareroot*

*System. Substrate System* merupakan sistem yang menggunakan media tanam sedangkan *Bareroot System* tidak menggunakan media tanam untuk membantu pertumbuhan tanamannya. Pada penelitian ini dilakukan sistem yang pertama, yaitu *Substrate System* menggunakan *rockwool*.

*Rockwool* adalah nama komersial media tanaman utama yang telah dikembangkan dalam sistem budidaya tanaman tanpa tanah. Bahan ini berasal dari bahan batu basalt yang bersifat *inert* yang dipanaskan sampai mencair, kemudian cairan tersebut di-*spin* (diputar) seperti membuat arumanis sehingga menjadi benang-benang yang kemudian dipadatkan seperti kain '*wool*' yang terbuat dari '*rock*'. *Rockwool* biasanya dibungkus dengan plastik. *Rockwool* ini juga populer dalam sistem *bag culture* sebagai media tanam. *Rockwool* juga banyak dimanfaatkan untuk produksi bibit tanaman sayuran dan tanaman hias (Susila, 2013: 3-4).

### **C. *Greenhouse***

Rumah kaca (*greenhouse*) merupakan alat pelindung tanaman secara tertutup dari bahan yang terbuat dari plastik atau bahan lain, yang mana bahan tersebut diletakkan menyelubungi suatu tanaman dengan ketinggian tertentu sehingga diperoleh iklim basah dan hangat serta bebas dari stres yang menyebabkan pertumbuhan tanaman terganggu. Dalam rumah kaca, faktor iklim mempunyai pengaruh besar terhadap pertumbuhan dan hasil produksi tanaman. Iklim merupakan faktor yang paling dominan yang mempengaruhi keduanya dan dapat direkayasa oleh manusia. Tanaman tidak dapat bertahan dalam iklim yang

buruk, walaupun dapat bertahan tidak akan dapat diharapkan hasil panen yang optimal. Secara umum iklim dalam *greenhouse* yang baik dicirikan oleh temperatur, penyinaran matahari, kelembapan relatif dan CO<sub>2</sub> (Sunardi, 2004: 3).

Rumah kaca merupakan media yang digunakan untuk mengendalikan dan menjaga keadaan iklim, serta lingkungan di dalam suatu ruangan atau bisa disebut dengan iklim buatan untuk menjaga kelembapan udara, tanah, suhu dan intensitas cahaya. Oleh karena itu besarnya suhu, tingkat kelembapan dan kadar asam dalam tanah di dalam rumah kaca tersebut akan berbeda dengan kondisi suhu, kelembapan dan tanah di luarnya. Beberapa parameter yang diperhatikan di dalam rumah kaca, diantaranya adalah suhu ruangan, suhu tanah, kelembapan udara, pengairan, pemupukan, kadar cahaya dan pergerakan sirkulasi udara (ventilasi). Rumah kaca untuk daerah beriklim tropis sangat memungkinkan dan mempunyai banyak keuntungan dalam produksi dan budidaya tanaman. Produksi dapat dilakukan sepanjang tahun tanpa dipengaruhi perubahan cuaca, di mana produksi dalam lahan yang terbuka tidak memungkinkan karena adanya berbagai faktor yang tidak menunjang dalam budidaya tanaman seperti curah hujan yang terlalu tinggi, suhu yang ekstrim, angin yang kencang dan berbagai faktor lainnya (Yopi, 2014: 6).

## D. Cahaya

### 1. Cahaya Matahari

Cahaya (radiasi) adalah gelombang elektromagnetik yang melewati ruang dan datang sebagai paket energi diskrit (foton). Setiap foton memiliki panjang gelombang dengan tingkat energi tertentu ( $E$ , dalam joule).

$$E = hc/\lambda \quad (2.1)$$

$E$  : Energi per foton (joule per foton)

$h$  : Konstanta Planck ( $6,63 \times 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$ )

$c$  : Kecepatan cahaya ( $3,0 \times 10^8 \text{m/s}$ )

$\lambda$  : Panjang gelombang (meter)

(Hernandez, 2012: 2).

Cahaya mutlak diperlukan dalam proses fotosintesis. Cahaya secara langsung berpengaruh terhadap pertumbuhan setiap tanaman. Pengaruh cahaya secara langsung dapat diamati dengan membandingkan tanaman yang tumbuh dalam keadaan gelap dan terang. Pada keadaan gelap, pertumbuhan tanaman mengalami etiolasi yang ditandai dengan pertumbuhan yang abnormal (lebih panjang), pucat, daun tidak berkembang dan batang tidak kukuh. Sebaliknya dalam keadaan terang tumbuhan lebih pendek, batang kukuh, daun berkembang sempurna dan berwarna hijau. Dalam fotosintesis, cahaya berpengaruh langsung terhadap ketersediaan makanan. Tumbuhan yang tidak terkena cahaya tidak dapat membentuk klorofil, sehingga daun menjadi pucat. Lama penyinaran mempunyai

pengaruh yang spesifik terhadap pertumbuhan dan perkembangan tumbuhan (Yopi, 2014: 7).

Setiap jenis tanaman memiliki sifat yang berbeda dalam hal fotoperiodisme, yaitu lamanya penyinaran dalam satu hari yang diterima tanaman. Perbedaan respon tanaman terhadap lama penyinaran atau disebut juga fotoperiodisme, menjadikan tanaman dikelompokkan menjadi tanaman hari netral, tanaman hari panjang, dan tanaman hari pendek. Kekurangan cahaya matahari akan mengganggu proses fotosintesis dan pertumbuhan, meskipun kebutuhan cahaya tergantung pada jenis tanaman.

Di daerah tropis dengan intensitas yang tinggi, fotooksidasi lebih kecil dibandingkan di daerah sedang, oleh karena itu fotorespirasinya cepat. Hal ini mengakibatkan sintesis protein kurang. Intensitas cahaya matahari menunjukkan pengaruh primer pada fotosintesis, dan pengaruh sekundernya pada morfogenetik. Pengaruh terhadap morfogenetik hanya terjadi pada intensitas rendah (Fitter dan Hay, 1991).

Pengaruh tanaman dalam kaitannya dengan intensitas cahaya salah satunya adalah penempatan daun dalam posisi di mana akan diterima intersepsi cahaya maksimum. Daun yang menerima intensitas maksimal adalah daun yang berada pada tajuk utama yang terkena sinar matahari (Fitter dan Hay, 1991).

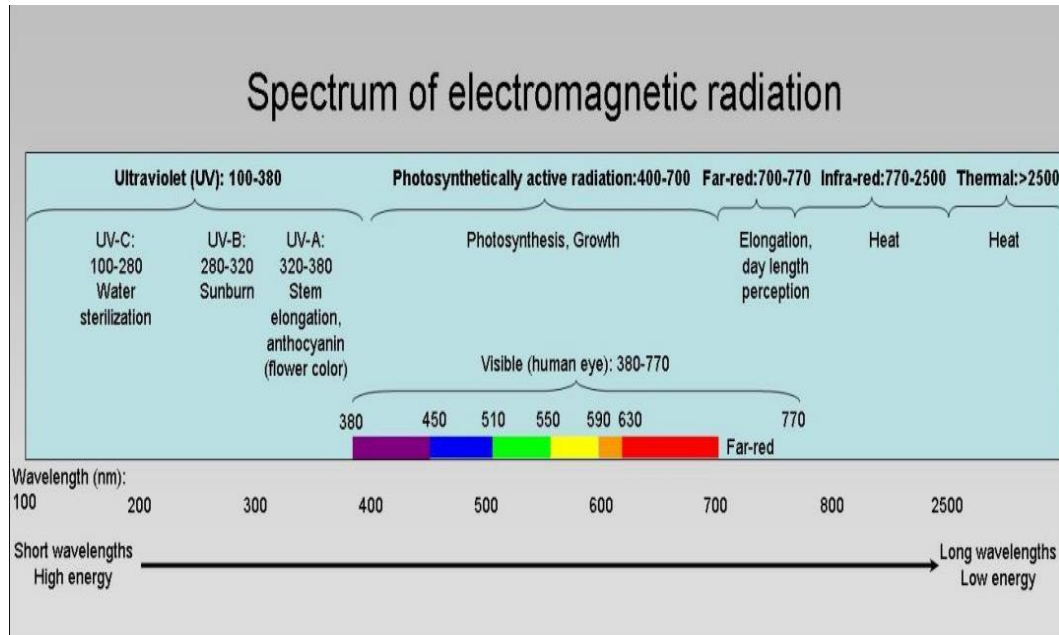
#### **a. Karakteristik Pencahayaan**

Cahaya memiliki tiga karakteristik dasar: kuantitas, kualitas dan lamanya penyinaran yang mempengaruhi pertumbuhan tanaman. Kuantitas cahaya merujuk

pada intensitas atau konsentrasi cahaya, yaitu jumlah cahaya yang disuplai ke tanaman yang digunakan untuk fotosintesis. Tanaman menerima sebagian besar cahaya sampai titik saturasi, kapasitas yang tinggi tersebut menyebabkan tanaman tumbuh melalui proses fotosintensis. Kualitas cahaya merujuk pada warna atau panjang gelombang yang mengenai tanaman dan dapat ditingkatkan menggunakan *supplemental lighting*. Terdapat perbedaan jumlah cahaya dari sumber yang ada. *Fluorescent* atau *cool-white* memiliki kualitas cahaya yang tinggi pada *range* biru dan digunakan untuk tanaman yang memiliki daun yang banyak. Lamanya penyinaran (fotoperiode) adalah lamanya hari atau jumlah jam per hari untuk tanaman menerima cahaya. Fotoperiode untuk tanaman dibagi menjadi tiga, yaitu tanaman hari panjang, tanaman hari pendek dan tanaman hari netral (Mattson, 2011).

## **b. Spektrum Cahaya**

Spektrum radiasi matahari terdiri dari sinar gelombang pendek dan sinar gelombang panjang. Sinar gelombang pendek, yaitu ultraviolet, sinar x, dan sinar gamma. Sedangkan yang termasuk sinar gelombang panjang adalah sinar infra merah. Jumlah dari radiasi matahari biasanya lebih besar daripada radiasi gelombang panjang (kecuali pada malam hari). Oleh karena itu, hanya sebagian radiasi matahari yang digunakan oleh tanaman untuk fotosintesis. Hal ini disebut sebagai *Photosynthetically Active Radiation (PAR)* yang terdiri dari rentang panjang gelombang antara (400-700) nm dan masuk ke dalam spektrum cahaya tampak (380-770) nm yang dapat dilihat oleh mata manusia.

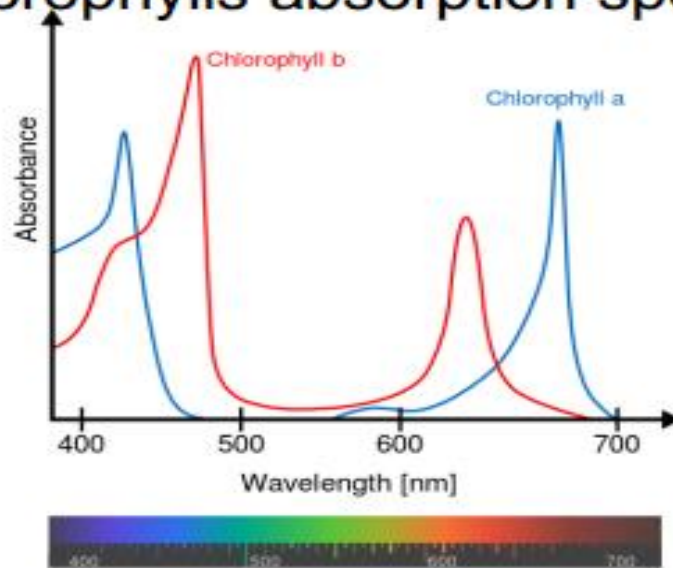


Gambar 1. Spektrum cahaya matahari dan satuannya  
(Hernandez, 2012: 5)

Jumlah energi yang terdapat pada cahaya berbanding terbalik dengan panjang gelombangnya (panjang gelombang terbesar memiliki energi yang paling sedikit). Hal ini menjelaskan bahwa cahaya biru memiliki energi lebih banyak daripada cahaya merah. Walaupun demikian, cahaya biru akan menyebabkan respon yang sama seperti cahaya merah.

Klorofil adalah pigmen berwarna hijau pada tumbuhan. Pigmen ini berperan penting dalam proses fotosintesis dengan menyerap energi cahaya dan mengubahnya menjadi energi kimia. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2 bahwa absorbansi maksimal klorofil a dan b terjadi pada cahaya biru dan merah. Cahaya merah dan biru merupakan kebutuhan penting bagi tanaman dalam perkembangan luas daun dan peningkatan biomassa.

## Chlorophylls absorption spectra



Gambar 2. Spektrum absorpsi klorofil (Hernandez, 2012: 6)

Menurut Muneer. *et al* (2014), biomassa dan parameter fotosintesis pada tanaman selada mengalami peningkatan seiring dengan peningkatan intensitas cahaya dibawah cahaya LED berwarna biru. Membuka dan menutupnya stomata dan sebagian besar aktivitas fotosintesis merespon LED biru dengan intensitas tinggi. Respon fotosintesis lebih sensitif pada LED biru daripada LED merah dan hijau. LED biru yang dikombinasikan dengan intensitas cahaya yang tinggi lebih efisien dalam produksi biomassa tanaman.

## 2. Satuan Untuk Cahaya

Satuan merupakan sesuatu yang dapat menunjukkan kuantitas suatu besaran. Satuan selalu berkaitan dengan pengukuran fisika. Terdapat beberapa satuan yang digunakan untuk besaran cahaya, seperti candela, lumens dan lux.

Lux merupakan satuan cahaya yang banyak digunakan dalam pengukuran intensitas cahaya.

Lux adalah banyak arus 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)*.  $1 \text{ lm/ft}^2$  sama dengan 10,79 lux (Noer, 2015: 6).

## **E. Sistem Kontrol**

Sistem kontrol dalam hal ini mempunyai pengertian sebagai sistem yang mengontrol sebuah variabel untuk mendapatkan nilai yang diinginkan (Bolton, 2006: 85). Sistem kontrol yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu sistem kontrol *closed-loop* yang merupakan sistem kontrol di mana sinyal keluarannya mempunyai pengaruh langsung pada aksi pengontrolan. Sistem kontrol ini memiliki fungsi memperkecil kesalahan dan membuat agar keluaran sistem mendekati harga yang diinginkan (Ogata, 1995: 4).

### **1. Fungsi Transfer**

Istilah *gain* digunakan untuk menunjukkan relasi antara masukan dan keluaran sebuah sistem, di mana gain  $G = \text{keluaran/masukan}$ . Bila masukan dan keluaran sistem yang dinyatakan dalam bentuk fungsi  $s$ , maka fungsi alih atau *transfer function*  $G(s)$  didefinisikan sebagai [keluaran  $Y(s)$ /masukan  $X(s)$ ] ketika semua kondisi mula-mula sebelum masukan dikenakan adalah sama dengan nol.

Sistem linier parameter konstan dinyatakan dengan persamaan diferensial linier berikut:

$$a_0 y^n + a_1 y^{n-1} + \dots + a_{n-1} \dot{y} + a_n y = b_0 x^m + b_1 x^{m-1} + \dots + b_{m-1} \dot{x} + b_m x \quad (2.2)$$

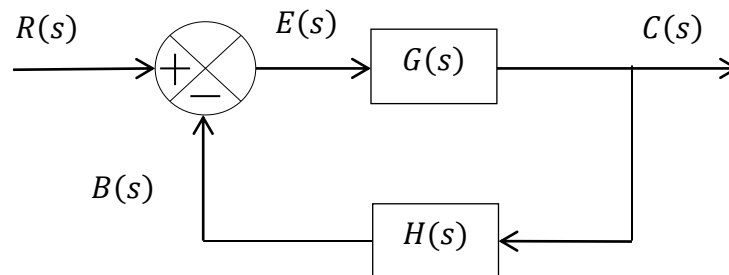
dengan ( $n \geq m$ ).  $y$  adalah keluaran sistem dan  $x$  adalah masukan sistem.

$$\text{Fungsi alih} = G(s) = \frac{\mathcal{L}[\text{keluaran}]}{\mathcal{L}[\text{masukan}] |_{\text{keadaan awal nol}}}$$

$$= \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \dots + b_{m-1} s + b_m}{a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + a_n} \quad (2.3)$$

(Ogata, 2003: 107).

## 2. Diagram Blok



Gambar 3. Diagram blok sistem kontrol *closed-loop* dengan elemen umpan balik

Untuk sistem kontrol seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3, keluaran  $C(s)$  dan masukan  $R(s)$  dihubungkan sebagai berikut:

$$C(s) = G(s)E(s) \quad (2.4)$$

$$E(s) = R(s) - B(s) = R(s) - H(s)C(s) \quad (2.5)$$

Apabila  $E(s)$  dari persamaan (2.5) disubstitusikan ke persamaan (2.4), maka diperoleh

$$C(s) = G(s)[R(s) - H(s)C(s)] \quad (2.6)$$

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1+G(s)H(s)} \quad (2.7)$$

Hubungan fungsi transfer  $C(s)$  terhadap  $R(s)$  disebut sebagai fungsi transfer *closed-loop*. Fungsi transfer ini berkaitan dengan dinamika sistem *closed-loop* terhadap elemen umpan maju dan elemen umpan balik. Sehingga dari persamaan (2.7) diperoleh,

$$C(s) = \frac{G(s)}{1+G(s)H(s)} R(s) \quad (2.8)$$

Keluaran (respon) sistem *closed-loop* tergantung pada kedua fungsi transfer dan karakter masukan (Ogata, 2003: 494).

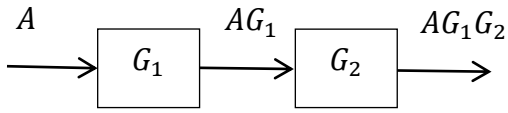
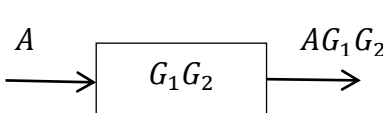
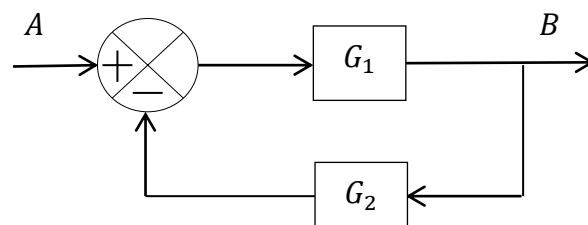
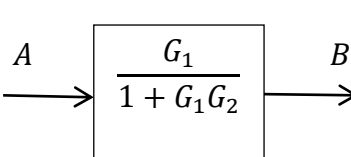
Blok-blok hanya dapat dihubungkan secara seri jika keluaran suatu blok tidak dipengaruhi oleh blok-blok yang mengikutinya. Jika terdapat pengaruh pembebanan antar komponen, maka perlu dilakukan penggabungan ke dalam satu blok saja.

Dalam menyederhanakan diagram blok, perlu diperhatikan beberapa hal berikut:

- a. Hasil kali fungsi alih pada arah umpan maju harus tetap sama.
- b. Hasil kali fungsi alih pada pengelilingan lingkaran tertutup harus tetap sama.

Aturan umum dalam menyederhanakan diagram blok adalah dengan memindahkan titik cabang dan titik penjumlahan, saling menukar titik penjumlahan dan kemudian menghilangkan lingkaran umpan balik di dalamnya.

Tabel 2. Aturan penyederhanaan diagram blok (Noer, 2015: 13)

No.	Diagram blok asal	Diagram blok pengganti
1.		
2.		

### 3. Kontrol Otomatis

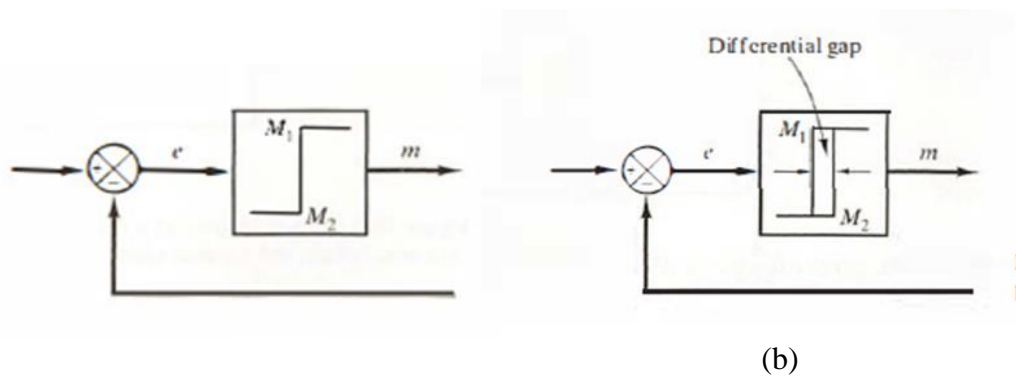
Dalam sistem kontrol dua posisi, elemen penggerak hanya memiliki dua kedudukan tetap yaitu nyala atau mati. Jika sinyal keluaran dari kontroler adalah  $m(t)$  dan sinyal *error* nya adalah  $e(t)$ , maka dalam kontrol dua posisi ini sinyal  $m(t)$  akan berada pada nilai yang tetap, maksimum atau minimum tergantung pada sinyal *error* nya apakah bernilai positif atau negatif, sehingga

$$m(t) = M_1, \text{ jika } e(t) > 0$$

$$m(t) = M_2, \text{ jika } e(t) < 0 \quad (2.9)$$

di mana  $M_1$  dan  $M_2$  bernilai konstan. Nilai minimum  $M_2$  adalah nol atau  $-M_1$  (Ogata, 2003: 502).

Ogata (2003: 502) mengatakan *differential gap* merupakan suatu rentang di mana sinyal *error* harus bergerak sebelum terjadi pertukaran nilai keluaran kontroler. *Differential gap* menyebabkan keluaran  $m(t)$  kontroler mempertahankan nilainya sampai sinyal *error* bergerak sedikit melebihi nilai nol. Dalam beberapa kasus, *differential gap* terjadi karena gesekan yang tidak diinginkan dan kelambatan gerak. Namun, *differential gap* mencegah operasi *on-off* yang terlalu sering yang dapat menyebabkan cepat aus dan menghabiskan banyak energi.



Gambar 4. (a) Diagram blok kontroler *on-off* (b) Diagram blok kontroler *on-off* dengan *differential gap* (Ogata, 2003: 503)

#### 4. Transformasi Laplace

Transformasi Laplace merupakan sebuah metode operasional yang dapat digunakan untuk menyelesaikan persamaan diferensial linier. Kelebihan dari metode ini adalah memungkinkan penggunaan teknik grafis untuk meramal performansi sistem tanpa menyelesaikan persamaan diferensial sistem (Ogata, 1995: 20).

Transformasi Laplace merupakan suatu fungsi  $F$  dari  $s$ , atau dapat ditulis sebagai  $F(s)$ , di mana  $s$  adalah variabel kompleks. Jika terdapat sebuah fungsi  $f(t)$  di mana  $f(t) = 0$  untuk  $t < 0$ , maka transformasi Laplacenyanya adalah:

$$\mathcal{L}[f(t)] = F(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} dt [f(t)] = \int_0^{\infty} f(t) e^{-st} dt \quad (2.10)$$

Proses sebaliknya untuk mencari fungsi waktu  $f(t)$  dari transformasi Laplace  $F(s)$  disebut sebagai invers transformasi Laplace, dengan notasi  $\mathcal{L}^{-1}$ .

$$\mathcal{L}^{-1}[F(s)] = f(t) \quad (2.11)$$

Beberapa fungsi dapat ditemui dalam operasi transformasi Laplace, salah satunya fungsi eksponensial.

$$\begin{aligned} f(t) &= 0 && \text{untuk } t < 0 \\ &= Ae^{-\alpha t} && \text{untuk } t \geq 0 \end{aligned} \quad (2.12)$$

di mana  $A$  dan  $\alpha$  konstan. Transformasi Laplace dari fungsi eksponensial ini diperoleh sebagai berikut:

$$\mathcal{L}[Ae^{-\alpha t}] = \int_0^{\infty} Ae^{-\alpha t} e^{-st} dt = A \int_0^{\infty} e^{-(\alpha+s)t} dt = \frac{A}{s+\alpha} \quad (2.13)$$

dengan syarat konvergensi, yaitu  $x > -\alpha$  (Ogata, 2003: 15).

Metode transformasi Laplace menghasilkan solusi persamaan diferensial linier secara lengkap. Metode sederhana untuk menemukan solusi lengkap dari persamaan diferensial memerlukan penaksiran konstanta integrasi dari kondisi awal. Namun, dalam metode transformasi Laplace ini hal tersebut tidak perlu dilakukan karena secara otomatis kondisi awal termasuk ke dalam persamaan diferensial transformasi Laplace (Ogata, 2003: 34).

Jika semua kondisi awal adalah nol, maka transformasi Laplace dari persamaan diferensial yang diperoleh hanya dengan mengganti  $d/dt$  dengan  $s$ ,  $d^2/dt^2$  dengan  $s^2$ , dan seterusnya (Ogata, 2003: 34).

Berikut langkah-langkah penggunaan transformasi Laplace:

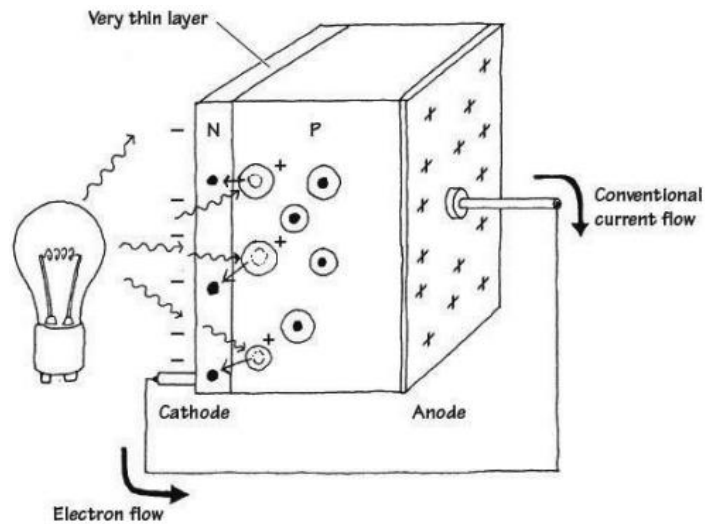
- Mengubah persamaan diferensial menjadi persamaan aljabar dalam domain  $s$  dan melakukan manipulasi aljabar seperti penjumlahan, pengurangan, perkalian, dan pembagian.
- Mentransformasikan kembali fungsi dalam bentuk  $s$  menjadi fungsi waktu dengan invers transformasi Laplace.

Tabel 3. Tabel Transformasi Laplace (Ogata, 2003: 18)

	$f(t)$	$F(s)$
1	Unit impulse $\delta(t)$	1
2	Unit step $1(t)$	$\frac{1}{s}$
3	$t$	$\frac{1}{s^2}$
4	$\frac{t^{n-1}}{(n-1)!}$ ( $n = 1, 2, 3, \dots$ )	$\frac{1}{s^n}$
5	$t^n$ ( $n = 1, 2, 3, \dots$ )	$\frac{n!}{s^{n+1}}$
6	$e^{-at}$	$\frac{1}{s+a}$
7	$te^{-at}$	$\frac{1}{(s+a)^2}$
8	$\frac{1}{(n-1)!} t^{n-1} e^{-at}$ ( $n = 1, 2, 3, \dots$ )	$\frac{1}{(s+a)^n}$
9	$t^n e^{-at}$ ( $n = 1, 2, 3, \dots$ )	$\frac{n!}{(s+a)^{n+1}}$
10	$\sin \omega t$	$\frac{\omega}{s^2 + \omega^2}$
11	$\cos \omega t$	$\frac{s}{s^2 + \omega^2}$
12	$\sinh \omega t$	$\frac{\omega}{s^2 - \omega^2}$
13	$\cosh \omega t$	$\frac{s}{s^2 - \omega^2}$

## 5. Rangkaian Sensor

### a. Sensor Fotodiode



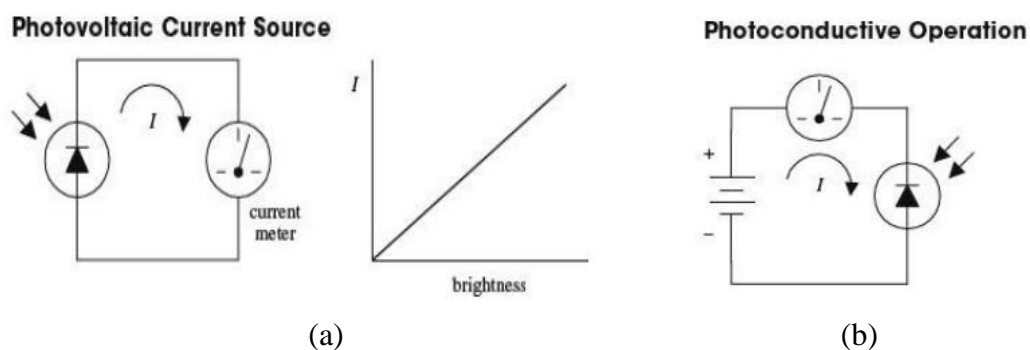
Gambar 5. Cara kerja fotodiode (Scherz, 2013: 1219)

Fotodiode adalah sebuah perangkat yang mengubah energi cahaya (energi foton) menjadi energi listrik. Jika kaki anoda dan katoda fotodiode disambung dengan kabel lalu fotodiode ditempatkan di tempat yang gelap, maka tidak ada arus yang mengalir melalui kabel. Namun, ketika fotodiode disinari maka fotodiode menjadi sumber arus lemah yang dapat mengalirkan arus dari katoda menuju anoda melalui sambungan kabel tersebut (Scherz, 2013: 1218).

Fotodiode terbuat dari lapisan tipis semikonduktor tipe- $p$  dan tipe- $n$  (pada sisi  $n$  terdapat elektron; pada sisi  $p$  terdapat *hole*). Sisi  $n$  dianggap sebagai katoda, sisi  $p$  dianggap sebagai anoda. Jika fotodiode disinari cahaya, sejumlah foton akan melewati semikonduktor- $p$  dan semikonduktor- $n$ . Beberapa foton akan bertumbukan dengan elektron pada semikonduktor- $p$ , menginjeksi dan menghasilkan *hole*. Jika tumbukan tersebut cukup dekat dengan sambungan  $pn$ ,

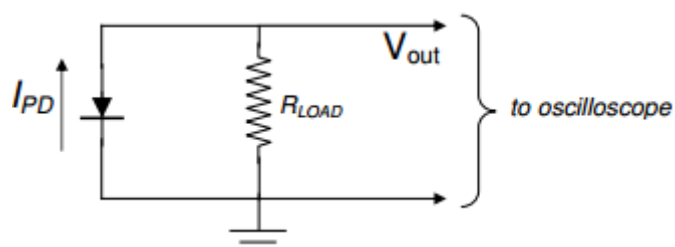
injeksi elektron tersebut akan melewati sambungan. Sehingga akan terdapat banyak elektron pada sisi  $n$  dan terdapat banyak *hole* pada sisi  $p$ . Pemisahan muatan positif dan negatif ini menyebabkan beda potensial di kedua sisi. Jika katoda (sisi  $n$ ) dan anoda (sisi  $p$ ) dihubungkan dengan kabel maka arus akan mengalir dari anoda ke katoda (Scherz, 2013: 1219-1220).

Terdapat dua mode operasi fotodioda, yaitu mode fotovoltaiik dan fotokonduktif. Pada mode fotovoltaiik, fotodioda mengubah energi cahaya menjadi arus yang dapat diukur menggunakan alat ukur. Hubungan antara intensitas cahaya (kecerahan) terhadap arus adalah linear. Pada mode fotokonduktif, fotodioda disambungkan dengan sebuah sumber tegangan dengan arah *reverse-bias*. Hal ini dilakukan karena arus yang dihasilkan fotodioda tidak cukup untuk menjalankan sebuah rangkaian pendeteksi cahaya. Ketika kondisi gelap, arus lemah yang dihasilkan fotodioda yang disebut sebagai *dark current* (dalam *range* nA) mengalir melewati fotodioda. Ketika fotodioda disinari, arus yang besar akan mengalir. Pada rangkaian mode fotokonduktif, baterai digunakan untuk menaikkan arus keluaran fotodioda. Sebuah resistor yang dihubungkan secara seri dengan dioda dan baterai dapat digunakan untuk kalibrasi alat ukur (Scherz, 2013: 1220-1221).



Gambar 6. (a) Mode fotovoltaiik fotodioda, (b) Mode fotokonduktif fotodioda (Scherz, 2013: 1220-1221)

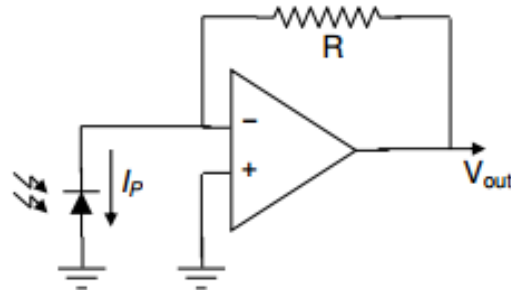
Cara sederhana untuk membaca arus yang dihasilkan fotodioda adalah mengubah arus tersebut ke tegangan dengan sebuah resistor seperti ditunjukkan pada Gambar 7. Rangkaian ini sangat sederhana, tapi memiliki kekurangan di mana harus menghasilkan tegangan yang melalui resistor sedangkan arus yang dihasilkan fotodioda sangat kecil. Fotodioda juga memiliki kapasitansi yang sebanding dengan daerah sambungannya (*depletion layer*) yang juga menentukan respon waktu dari fotodioda ( $\tau = RC$ ) (Eugeniy, 2012: 87).



Gambar 7. Fotodioda dengan sebuah resistor pengubah arus ke tegangan (Eugeniy, 2012: 87)

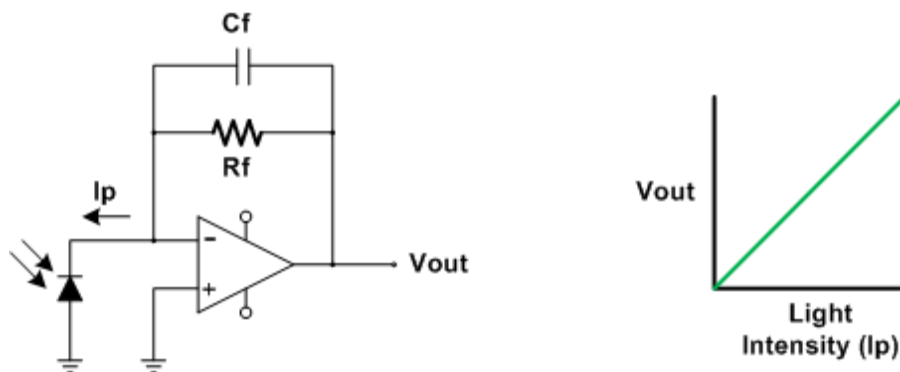
Semakin besar tegangan yang dihasilkan fotodioda, arus keluaran fotodioda tidak lagi sebanding dengan intensitas cahaya. Sebuah *op-amp* menyelesaikan masalah tersebut dengan menjaga tegangan yang melewati

fotodioda sama dengan nol untuk semua intensitas cahaya dan juga menguatkan sinyal pada rangkaian pengubah arus ke tegangan (Eugeniy, 2012: 87).



Gambar 8. Fotodioda dengan *op-amp* penguat inverting arus ke tegangan (Eugeniy, 2012: 87)

**b. Rangkaian *Transimpedance Amplifier* (TIA)**



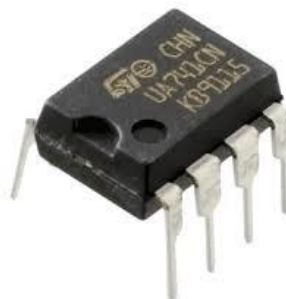
Gambar 9. Rangkaian *Transimpedance Amplifier* (TIA) ideal (Smith, 2014)

*Transimpedance Amplifier* (TIA) sering digunakan untuk mengubah keluaran arus sebuah sensor seperti pada fotodioda menjadi keluaran tegangan, karena banyak rangkaian dan alat yang hanya menerima masukan berupa tegangan. Rangkaian TIA terdiri dari sebuah *op-amp* dan resistor *feedback*, di mana resistor *feedback* terhubung dengan keluaran *op-amp* dan masukan *inverting*

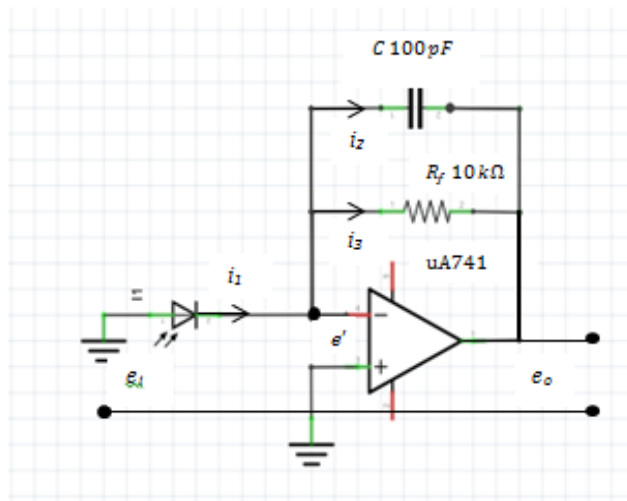
*op-amp*. Arus fotodiode mengalir melalui resistor *feedback* karena arus tidak mengalir melalui *op-amp*.

Penguat Operasional (*op-amp*) adalah penguat DC (searah) yang memiliki *gain* yang sangat tinggi, biasanya dalam orde 100.000 atau lebih, yang dikemas dalam bentuk IC pada sebuah *chip* silikon. *Op-amp* ini mempunyai dua masukan, yang dikenal sebagai masukan pembalik (–) dan masukan non-pembalik (+). Penguat operasional merupakan elemen yang banyak digunakan dalam rangkaian-rangkaian pengondisian dan pemrosesan sinyal.

Rangkaian *filter* pasif sangat sederhana dan dapat digunakan untuk mem-*filter* sinyal yang tidak diinginkan. Namun, karena *filter* pasif terdiri dari komponen pasif (resistor dan kapasitor), *filter* pasif menarik arus dari masukan dan ditambahkan “beban” yang dihubungkan ke keluaran rangkaian *filter*. *Op-amp* dapat menyelesaikan masalah tersebut di mana arus yang diambil dari masukan sangat kecil (karena *op-amp* memiliki resistansi internal yang besar, lebih dari 10 M $\Omega$ ). Demikian juga sebagai perangkat aktif, *op-amp* menyuplai arus untuk mengendalikan keluaran sehingga meminimalisir dampak pada rangkaian keluaran. Oleh karena itu, *op-amp* sering digunakan pada sambungan resistor dan kapasitor untuk membuat rangkaian *filter* aktif (Morris, 2013: 139).



Gambar 10. *Op-amp* UA741 (Gopal, 2016)



Gambar 11. Aliran arus yang mengalir di dalam rangkaian pengondisi sinyal fotodiode

Arus-arus yang mengalir dalam rangkaian pengondisi sinyal fotodiode seperti yang ditunjukkan pada Gambar 11, dapat ditentukan sebagai berikut:

$$i_1 = \frac{e_i - e'}{R(t)} ; \quad i_2 = C \frac{d(e' - e_o)}{dt} ; \quad i_3 = \frac{e' - e_o}{R_f} ; \quad (2.14)$$

Arus yang mengalir ke dalam penguat dapat diabaikan, sehingga diperoleh

$$i_1 = i_2 + i_3 \quad (2.15)$$

Jadi,

$$\frac{e_i - e'}{R(t)} = C \frac{d(e' - e_o)}{dt} + \frac{e' - e_o}{R_f} \quad (2.16)$$

Karena penguat operasional terhubung dengan *feedback* negatif, maka tegangan pada terminal negatif dan terminal positifnya sama sehingga  $e' = 0$ .

Kemudian  $e'$  disubstitusikan ke persamaan (2.16),

$$\frac{e_i}{R(t)} = -C \frac{de_o}{dt} - \frac{e_o}{R_f} \quad (2.17)$$

Dengan menggunakan transformasi Laplace dan menganggap keadaan awal sama dengan nol, maka diperoleh

$$\frac{E_i(s)}{R_s} = -\frac{R_f C s + 1}{R_f} E_o(s) \quad (2.18)$$

$$\frac{E_o(s)}{E_i(s)} = -\frac{R_f}{R_s} \frac{1}{R_f C s + 1} \quad (2.19)$$

## 6. Mikrokontroler Arduino

### a. Pengertian Arduino

Arduino adalah salah satu produk berlabel Arduino yang sebenarnya adalah suatu papan elektronik yang mengandung mikrokontroler ATmega328 (sebuah keping yang secara fungsional bertindak seperti sebuah komputer). Arduino Uno mengandung mikroprosesor (berupa Atmel AVR) dan dilengkapi dengan *oscillator* 16 MHz (yang memungkinkan operasi berbasis waktu dilaksanakan dengan tepat) dan regulator (pembangkit tegangan) 5 V. Sejumlah pin tersedia di papan. Pin 0 hingga 13 digunakan untuk isyarat digital yang hanya bernilai 0 atau 1, sedangkan pin A0-A5 digunakan untuk isyarat analog. Arduino Uno dilengkapi dengan *Static Random-Access Memory* (SRAM) berukuran 2KB untuk memegang data, *flash memory* berukuran 32KB, dan *Erasable Programmable Read-Only Memory* (EEPROM) untuk menyimpan program.



Gambar 12. Arduino UNO (Djuandi, 2011: 5)

Menurut Djuandi (2011: 4-12), *software* Arduino meliputi IDE (*Integrated Development Environment*) untuk menulis program, *driver* untuk koneksi dengan komputer, contoh program dan *library* untuk pengembangan program. IDE Arduino adalah *software* yang sangat canggih ditulis dengan menggunakan *Java*. IDE Arduino terdiri dari:

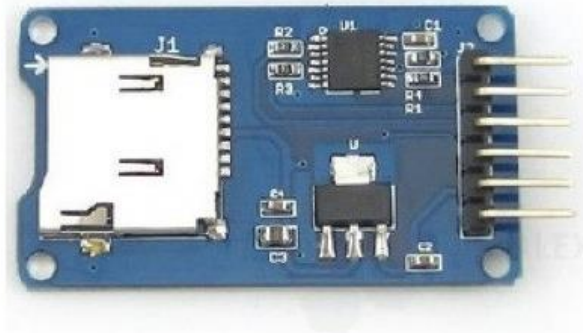
- Editor program, sebuah *window* yang memungkinkan pengguna menulis dan mengedit program dalam bahasa *Processing*.
- *Compiler*, sebuah modul yang mengubah kode program (bahasa *Processing*) menjadi kode biner. Bagaimanapun sebuah mikrokontroler tidak akan bisa memahami bahasa *Processing*. Yang bisa dipahami oleh mikrokontroler adalah kode biner. Itulah sebabnya *compiler* diperlukan dalam hal ini.
- *Uploader*, sebuah modul yang memuat kode biner dari komputer ke dalam *memory* di dalam papan Arduino.

Sebuah perintah pengendalian dapat dijalankan melalui program yang dimasukkan ke dalam Arduino. Pengendalian LED hingga pengontrolan robot dapat diimplementasikan dengan papan yang relatif kecil ini.

## b. *SD Card*

*Micro-SD Card Module* adalah sebuah perangkat sederhana yang dapat mentransfer data untuk dan dari *SD card*. Pin keluaran secara langsung kompatibel dengan Arduino, namun dapat juga digunakan dengan mikrokontroler lainnya. Perangkat ini mampu untuk penyimpanan data massal dan data *logging* untuk penelitian yang dilakukan.

*Module* ini memiliki antarmuka SPI yang kompatibel dengan *SD card* dan menggunakan *supply* 5 V atau 3,3 V yang kompatibel dengan Arduino Uno/Mega. *SD module* memiliki berbagai aplikasi seperti *data logger*, audio, video dan grafis.



Gambar 13. Modul *SD Card* Arduino

(Sumber: <http://store.fut-electronics.com/products/micro-sd-card-module>)

## 7. Transistor

Transistor adalah komponen semikonduktor yang bekerja sebagai kontrol *switch* atau kontrol *amplifier*. Transistor mampu mengontrol aliran arus listrik. Sebuah transistor bipolar NPN menggunakan *input* arus kecil dan tegangan positif pada basisnya untuk mengontrol arus kolektor ke emitor yang lebih besar. Untuk

transistor NPN, tegangan pada kolektor  $V_C$  lebih besar sekitar sepersepuluh volt dari tegangan pada emitor  $V_E$ . Jika tidak demikian, arus tidak akan mengalir pada sambungan kolektor-emitor, walaupun diberikan tegangan pada basisnya. Tegangan drop dari basis ke emitor sekitar 0,6 V. Hal ini menjelaskan bahwa tegangan basis  $V_B$  sedikitnya 0,6 V lebih besar dari tegangan emitor  $V_E$  (Scherz, 2013: 1014-1023).

## 8. *Relay*

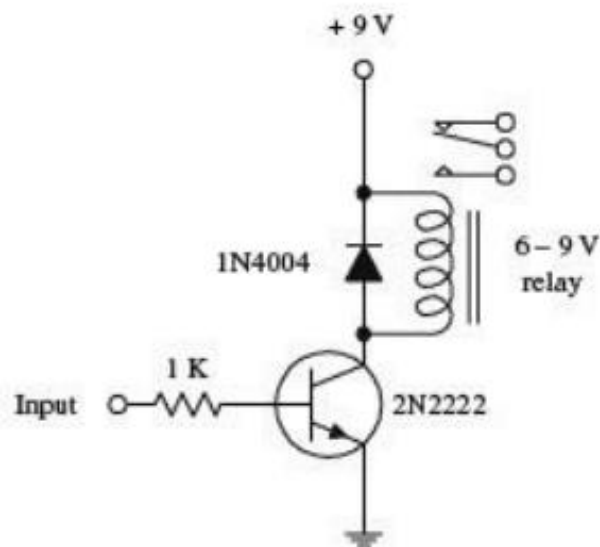
Untuk sebuah sistem listrik yang terdiri dari komponen kapasitansi dan resistansi, ketika suplai tegangannya dibuat dalam kondisi *on*, berarti terdapat masukan tegangan berbentuk tangga satuan ke sistem, maka arus rangkaian akan berubah terhadap waktu sebelum pada akhirnya mencapai nilai keadaan tunak (Bolton W, 2006).

Dengan mode kontrol *on-off*, pada intinya pengontrol merupakan sebuah saklar yang diaktivasi oleh sinyal *error* dan hanya menyuplai sinyal pengoreksi *on-off*. Keluaran pengontrol hanya mempunyai dua nilai yang mungkin, yang ekuivalen dengan kondisi *on* dan *off*. Karenanya, pengontrol *on-off* sering dikenal dengan istilah *pengontrol dua-langkah*.

Kontrol *on-off* merupakan mode kontrol yang sederhana dan murah, dan sering kali digunakan di mana osilasi dapat direduksi hingga level yang dapat diterima. Salah satu bentuk pengontrol *on-off* yang banyak digunakan adalah *relay* (Bolton W, 2006).

Untuk mengubah keadaan *relay*, tegangan yang melalui kumparan magnetik *relay* setidaknya  $\pm 25\%$  dari nilai tegangan spesifik *relay*. Tegangan yang terlalu besar dapat merusak kumparan magnetik, sedangkan tegangan yang sangat kecil tidak cukup untuk menjalankan *relay* atau bahkan menyebabkan *relay* bekerja secara tidak stabil (Scherz, 2013: 730).

Kumparan *relay* bertindak seperti sebuah induktor. Induktor tidak menghendaki perubahan arus secara tiba-tiba. Jika arus yang mengalir melewati kumparan secara tiba-tiba diputus, *switch* akan dibuka dan kumparan akan merespon, tegangan sangat besar yang melewatinya menyebabkan lonjakan arus yang besar. Secara fisika, fenomena ini menghasilkan lonjakan medan magnetik dalam kumparan ketika arus diputus secara tiba-tiba (Scherz, 2013: 731).

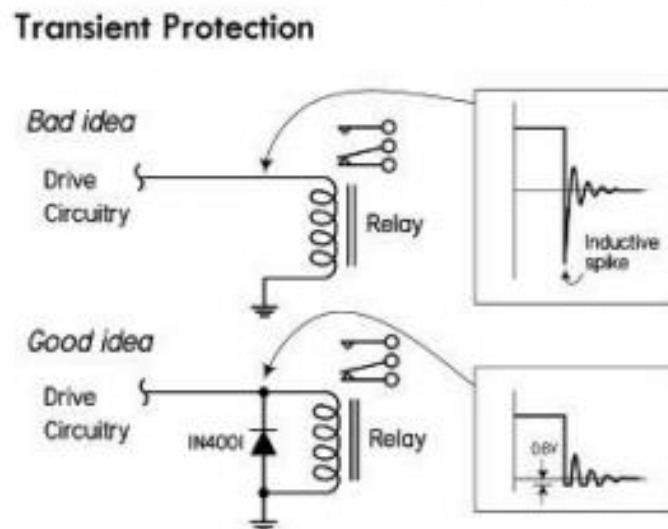


Gambar 14. Rangkaian saklar transistor (Scherz, 2013: 734)

Rangkaian pada Gambar 14 dapat digunakan jika sebuah *relay* dikendalikan oleh tegangan kontrol dengan nilai yang berubah-ubah. Transistor

bipolar NPN bertindak sebagai katup kontrol aliran arus. Ketika tidak ada *input* tegangan atau arus yang melalui basis transistor, *channel* kolektor ke emitor akan ditutup yang kemudian akan menghalangi arus yang mengalir ke kumparan *relay*. Namun, jika terdapat *input* tegangan dan arus yang cukup besar melalui basis transistor, *channel* kolektor ke emitor akan dibuka sehingga arus akan mengalir ke kumparan *relay* (Scherz, 2013: 735).

Ketika arus mengalir melalui sebuah induktor maka *switch* akan *off* secara tiba-tiba, lonjakan medan magnetik akan menghasilkan tegangan yang sangat besar secara tiba-tiba pada kumparan induktor. Hal ini sering terjadi terutama pada kumparan *relay*. Sebuah dioda yang ditempatkan paralel dengan kumparan *relay* akan melindungi rangkaian dengan men-*short circuit* lonjakan tegangan tinggi tersebut dan juga melindungi kontak mekanik *relay* yang sering mengalami *slapped* selama proses induktif (Scherz, 2013: 976).



Gambar 15. Penggunaan dioda dengan kumparan *relay* (Scherz, 2013: 976)

## 9. *Light Emitting Diode (LED)*

LED adalah salah satu jenis diode semikonduktor yang dapat dikontrol susunan *spectralnya* dan intensitas cahayanya dapat disesuaikan terhadap fotoreseptor tanaman agar melengkapi pertumbuhan yang lebih baik dan mempengaruhi morfologi tanaman dalam proses fisiologis seperti pembungaan dan efisiensi fotosintesis (Yeh N, 2009). LED mampu menghasilkan intensitas yang tinggi dengan keluaran panas yang rendah dan mampu mempertahankan keluaran cahayanya sampai bertahun-tahun. LED tidak memiliki filamen seperti pada lampu pijar atau lampu *fluorescent* yang membutuhkan energi listrik yang lebih dan menghasilkan panas, LED menghasilkan panas yang rendah sehingga dapat ditempatkan dekat dengan tanaman dan keluarannya dapat diubah walaupun dengan intensitas yang tinggi (Barta et.all, 1992).

Pencahayaan LED adalah jenis pencahayaan yang menggunakan *light emitting diode* sebagai sumber iluminasi/pencahayaan. Cahaya lampu LED lebih efisien daripada lampu *fluorescent* atau *incandescent*. LED adalah sebuah alat semikonduktor yang mengubah listrik menjadi cahaya yang disebabkan oleh perpindahan elektron. Ada beberapa keuntungan dari penggunaan LED dibandingkan dengan jenis pencahayaan lainnya. LED tidak mengandung merkuri atau bahan berbahaya lainnya dan tidak memancarkan sinar UV. LED juga tahan dengan guncangan dan getaran. Lampu LED kecil menghasilkan panas yang sangat kecil, sehingga dingin ketika dipegang. LED juga tidak menghasilkan gelombang frekuensi radio, sehingga tidak berinterferensi dengan pancaran gelombang TV atau radio.

Penggunaan lampu untuk tanaman hidroponik (*growlight*) sudah dilakukan oleh beberapa peneliti. Hasil penelitian Kobayashi et.al. (2013), menunjukkan bahwa penambahan lampu LED dapat mempercepat panen selada. Lampu LED warna biru merangsang pertumbuhan vegetatif, sedangkan warna merah mempercepat proses pembungaan (Dea, 2016: 14).

Walaupun cahaya merah dan biru mendukung dalam proses fotosintesis, sebagian besar tanaman berkembang dalam spektrum cahaya penuh. Pertumbuhan tanaman di bawah cahaya monokromatik dari LED dalam mengontrol lingkungan dapat diubah untuk pertumbuhan dan perkembangan tanaman. LED monokromatik dapat digunakan untuk *supplemental lighting* dalam *greenhouse* dan diharapkan dapat bekerja dengan baik untuk melengkapi spektrum cahaya ketika tingkat cahaya matahari rendah (Karlsson, 2014: 13-14).

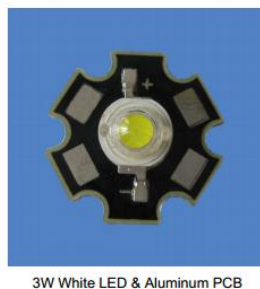
LED atau teknologi sejenisnya nampaknya akan menjadi sumber energi baru untuk pencahayaan dalam *greenhouse* di masa depan. Saat ini teknologi LED masih dalam pengembangan mengenai keluaran cahayanya, disain piranti dan aplikasinya pada *greenhouse* serta diharapkan LED akan menjadi sumber energi yang efisien. Efisiensi LED sama dengan lampu HID bila dibandingkan pada kegunaan dasar cahayanya untuk fotosintesis dan pertumbuhan tanaman (Runkle et al., 2014).

#### **a. High Power LED (HPL)**

*High Power* LED adalah sebuah dioda yang memancarkan cahaya dengan arus yang tinggi. LED dengan daya rendah umumnya memiliki daya 0,1W dan

beroperasi dengan arus sebesar 20 mA, tetapi daya *High Power* LED dapat mencapai 1 W, 2 W, atau bahkan sampai 10 W dan beroperasi dengan rentang arus berkisar 10 mA sampai beberapa ratus miliampere. Karena kendala efisiensi konversi fluks dan biayanya yang tinggi, *High Power* LED umumnya digunakan dalam beberapa pencahayaan khusus hanya untuk jangka pendek dan tujuan jangka panjang untuk pencahayaan umum (Anonim, 2013).

Keuntungan penggunaan *High Power* LED, yaitu konsumsi daya yang rendah, sedikit menghasilkan panas, panjang umur hidupnya, respon yang cepat, arah sebaran yang baik dan lain sebagainya. Sedangkan kelemahan dari *High Power* LED adalah efisiensi konversi dari arus ke cahaya masih rendah dan biayanya yang tinggi.



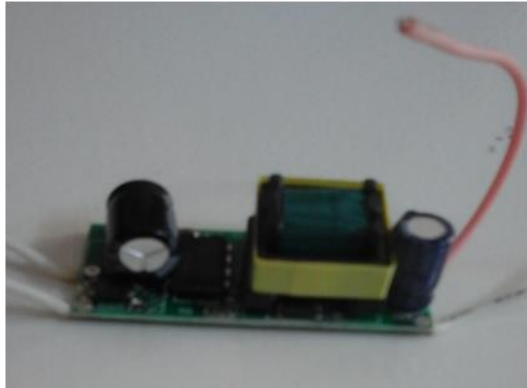
Gambar 16. *High Power* LED 3 watt dan PCB aluminium  
(Sumber: [www.wayjun.com](http://www.wayjun.com))

## 10. *Driver* LED

*Driver* LED adalah sebuah *power supply* yang memiliki keluaran yang sesuai dengan karakteristik LED. Tingkat *power* LED dipertahankan konstan oleh *driver* LED yang disebabkan karakteristik kelistrikan berubah akibat kenaikan dan

penurunan suhu LED. Tanpa *driver*, LED menjadi terlalu panas dan tidak stabil, sehingga menyebabkan kemampuannya rendah atau rusak.

Jumlah LED maksimum yang dapat dinyalakan oleh sebuah *driver* ditentukan dengan membagi keluaran tegangan maksimum *driver* dengan tegangan *forward* LED.



Gambar 17. *Driver* LED

## 11. Sistem Pengukuran (Kalibrasi)

Syarat utama dari suatu sistem pengukuran adalah kesesuaian tujuan. Hal ini berarti bahwa jika panjang dari sebuah produk harus diukur pada tingkat akurasi tertentu, maka sistem pengukurannya harus mampu digunakan untuk melakukan pengukuran pada tingkat akurasi tersebut. Untuk memberikan akurasi yang ditetapkan, maka sistem pengukuran harus dikalibrasikan untuk mendapatkan akurasi tersebut. Kalibrasi adalah proses perbandingan keluaran dari sistem pengukuran terhadap standar yang telah diketahui akurasinya. Standar disini dapat berupa sistem pengukuran lain yang digunakan khusus untuk pengkalibrasian atau sarana untuk menentukan nilai-nilai standar (Bolton, 2006).

Kalibrasi sebuah alat merupakan pertimbangan yang sangat penting dalam sistem pengukuran. Semua alat memiliki *drift* dalam karakteristiknya, dan hal ini terjadi dipengaruhi oleh banyak faktor, seperti keadaan lingkungan di mana alat digunakan. Nilai *error* pada alat tidak pernah nol walaupun setelah alat dikalibrasi, hal ini terjadi karena selalu ada beberapa *error inherent* di dalam alat yang bekerja selama proses kalibrasi. Namun, error setelah kalibrasi bernilai kecil. *Error* kalibrasi kemudian muncul seiring dengan *drift* dalam karakteristik alat sampai kalibrasi berikutnya. *Error* terbesar yang muncul sebelum alat dikalibrasi ulang dapat diperkecil dengan menaikkan frekuensi kalibrasi sehingga besar *drift* kalibrasi berkurang (Morris, 2013: 41-42).

## **BAB III**

### **METODE PENELITIAN**

#### **A. Waktu dan Tempat Penelitian**

##### **1. Waktu Penelitian**

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan November 2015 sampai Oktober 2016.

##### **2. Tempat Penelitian**

- a. Pengukuran dan karakterisasi sensor fotodiode dilakukan di laboratorium Spektroskopi, FMIPA, UNY dan di tempat tinggal peneliti (Jl. Perhut No.9 Demangan Baru, Yogyakarta).
- b. Pembuatan *greenhouse*, perakitan alat, pengujian alat dan penelitian dilakukan di tempat tinggal peneliti (Jl. Perhut No.9 Demangan Baru, Yogyakarta).

#### **B. Variabel Penelitian**

1. Variabel Bebas : Intensitas cahaya ( $I_x$ ) yang mengenai tanaman selada dari semua sumber cahaya.
2. Variabel Terikat : Arus ( $I$ ) dan tegangan ( $V$ ).  
  
Dengan adanya perubahan intensitas di dalam *greenhouse* maka akan mengubah nilai arus dari fotodiode. Perubahan tersebut mengakibatkan

tegangan keluaran rangkaian sensor berubah dan arus dari rangkaian transistor yang diterima oleh LED juga berubah.

3. Variabel Kontrol : Larutan nutrisi tanaman selada.

### **C. Alat dan Bahan Penelitian**

1. Dioda 1N4002.
2. *Driver* LED HPL 3-4 \* 3W 650 mA.
3. Fotodioda sebagai sensor.
4. IC UA741.
5. Lampu LED 3 watt.
6. Luxmeter.
7. Module *SD Card*.
8. Mikrokontroler Arduino UNO.
9. Multimeter digital.
10. PCB.
11. Perlengkapan solder.
12. Plat Aluminium.
13. *Relay* DC 12V.
14. Resistor dan kapasitor.
15. Sumber daya 15V 2A.
16. Kabel.
17. Transistor 2N2222.

18. Tutup parfum.

#### **D. Program Analisis**

Program analisis yang digunakan adalah Livewire, Microsoft Excel, dan Origin 6.1.

#### **E. Teknik Pengambilan Data**

Proses pengambilan data dibagi menjadi dua bagian, yaitu tahap rancang bangun alat dan tahap pengujian alat.

##### **1. Tahap Rancang Bangun Alat**

Tahap rancang bangun alat merupakan proses yang dilakukan untuk menentukan disain alat yang akan dibuat, mulai dari rancangan kerja rangkaian sistem kontrol intensitas cahaya hingga menjadi alat yang siap difungsikan.

Tahap rancang bangun alat ini terdiri dari dua bagian, yaitu:

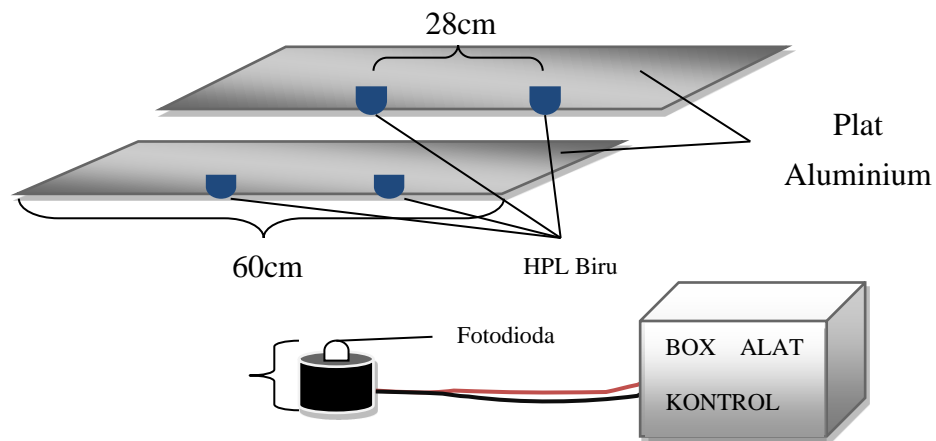
##### **a. Perancangan Disain Alat dan *Greenhouse***

###### **1) Konstruksi Alat Kontrol Intensitas Cahaya**

Alat ini terdiri dari komponen utama 4 buah LED jenis HPL berwarna biru, rangkaian *relay* sebagai aktuator dan saklar transistor, fotodiode sebagai sensor dan rangkaian kontrol menggunakan mikrokontroler Arduino Uno. Sensor fotodiode yang digunakan merupakan jenis fotodiode yang banyak ditemukan di pasaran dengan bentuk seperti LED berukuran 5 mm. Fotodiode dibungkus

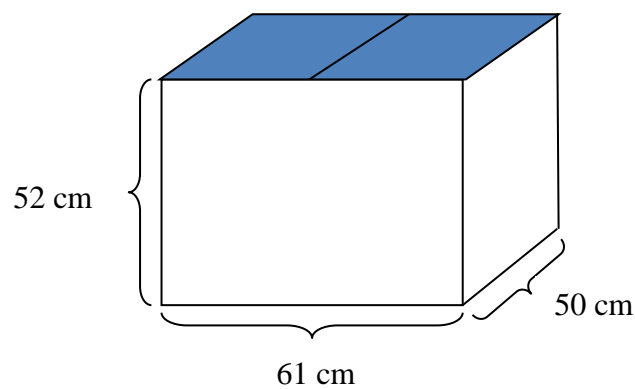
dengan tutup parfum bekas sebagai *body*-nya dan untuk memfokuskan cahaya yang terdeteksi fotodiode hanya berasal dari bagian atas.

LED yang digunakan adalah jenis HPL karena mampu menghasilkan cahaya yang sangat terang sehingga diharapkan mampu memenuhi kebutuhan cahaya untuk tanaman selada. Sebanyak 4 buah LED ditempelkan pada plat aluminium karena plat aluminium mampu mengurangi panas yang dihasilkan LED selama LED tersebut beroperasi, sehingga mengurangi dampak buruk terhadap kinerja LED.



Gambar 18. Disain alat penelitian

## 2) Konstruksi *Greenhouse*



Gambar 19. Konstruksi *Greenhouse*

Pada penelitian ini dibuat 3 buah *greenhouse* dengan ukuran (61 x 50 x 52) cm<sup>3</sup>. Dinding dari *greenhouse* yang digunakan terbuat dari mika bening, tiang penyangga dan alasnya terbuat dari *styrofoam*. Perbedaan dari ketiga *greenhouse* ini adalah pada atapnya, di mana atap *greenhouse* pertama (yang dikontrol intensitas cahayanya) terbuat dari mika berwarna biru, sedangkan *greenhouse* yang kedua atapnya juga terbuat dari mika berwarna biru namun di dalam *greenhouse* kedua tidak terdapat alat kontrol intensitas cahaya. Untuk *greenhouse* ketiga, atap dan dindingnya terbuat dari mika bening. Hal tersebut dilakukan untuk membandingkan pertumbuhan selada dengan tiga perlakuan yang berbeda.

Pada *greenhouse* pertama, sensor fotodiode menghadap ke atas dan terletak di tengah ruang agar cahaya yang dideteksi tidak terhalang oleh daun tanaman selada. Lampu LED tersusun pada 2 plat aluminium, di mana tiap plat terdapat 2 buah LED. Lampu LED berada di ketinggian sekitar 50 cm dari permukaan *greenhouse*, berjarak 28 cm antara LED yang satu dengan LED yang lainnya (dalam satu plat aluminium) dan menghadap ke bawah dengan harapan sebaran intensitas cahaya dapat mengenai tanaman selada secara merata.

Pada setiap *greenhouse* terdapat 10 buah tanaman selada dengan sistem tanam hidroponik menggunakan *rockwool* sebagai media tanamnya dan botol air mineral bekas sebagai tempat air nutrisi yang terdiri dari vitamin A dan B khusus untuk tanaman.

## **b. Perancangan Rangkaian Sistem Kontrol Intensitas Cahaya**

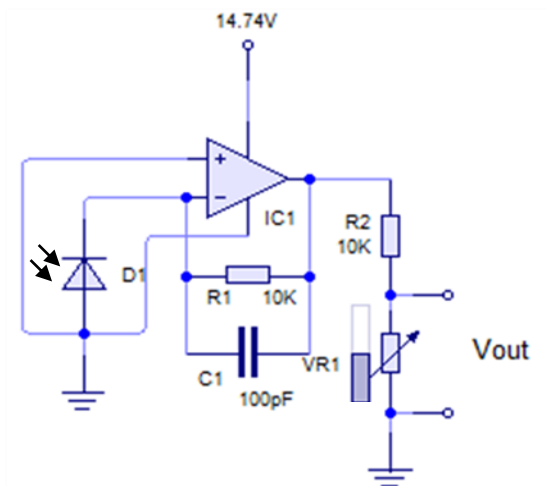
Sistem kontrol intensitas cahaya dalam *greenhouse* dirancang secara *closed-loop*. Beberapa tahapan perancangan dan pembuatan alat adalah sebagai berikut:

### 1) Perancangan Rangkaian Sensor

Sensor yang digunakan adalah fotodioda, yang akan mengalami perubahan arus apabila terjadi perubahan intensitas cahaya. Sehingga digunakan rangkaian pengondisi sinyal *Transimpedance Amplifier* (TIA) untuk mengubah perubahan nilai arus ( $I$ ) menjadi tegangan ( $V$ ).

Penguat yang digunakan dalam rangkaian *Transimpedance Amplifier* adalah IC UA741. Keluaran tegangan dari rangkaian pengondisi sinyal dihubungkan dengan rangkaian pembagi tegangan agar menghasilkan nilai tegangan maksimum sebesar 5 V. Hal ini dilakukan karena tegangan masukan maksimum mikrokontroler Arduino Uno hanya sebesar 5 V. Nilai keluaran minimum rangkaian sensor fotodioda sebesar 0,74 V dan nilai keluaran maksimumnya sebesar 5 V, di mana nilai minimumnya setara dengan 0 lux dan maksimumnya setara dengan 90 lux untuk cahaya biru.

Kemudian nilai keluaran dari pembagi tegangan tersebut dibandingkan dengan nilai *set point* pada program yang telah diatur. Program untuk membandingkan antara nilai keluaran tegangan sensor dengan *set point* dimasukkan ke dalam mikrokontroler Arduino Uno.



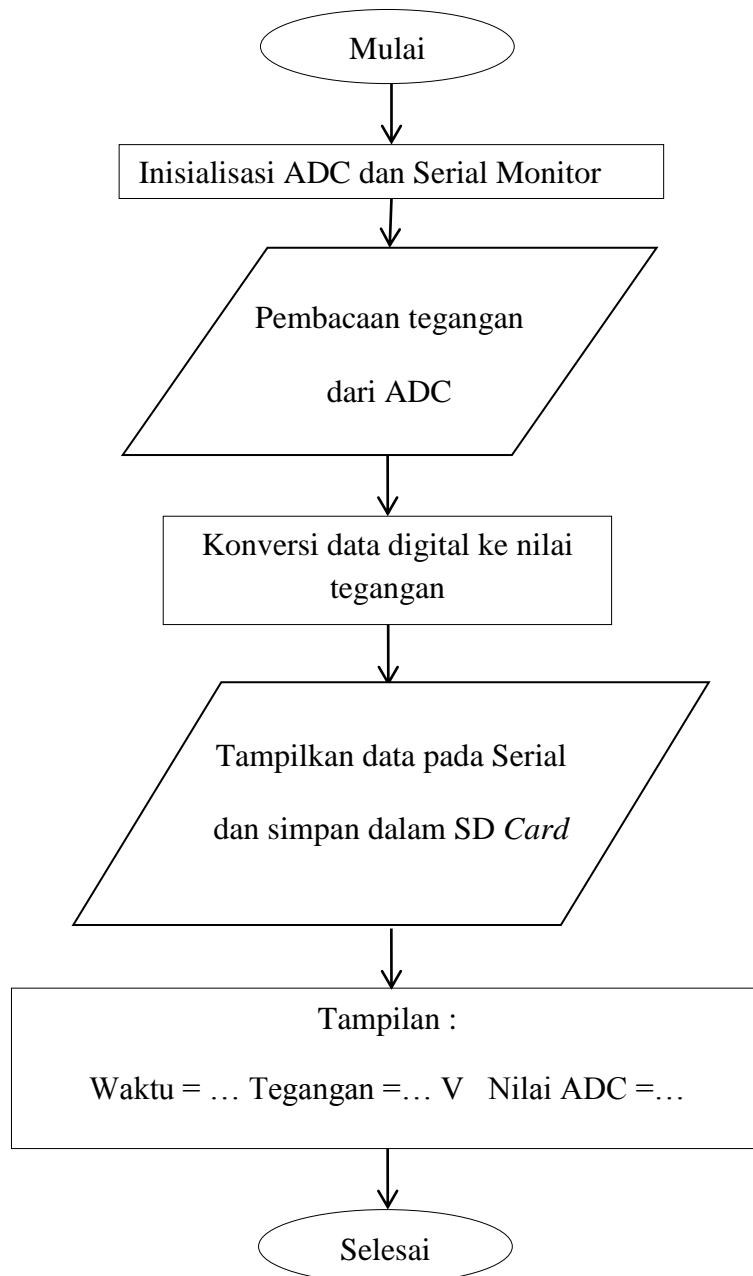
Gambar 20. Rangkaian sensor fotodiode

## 2) Perancangan Rangkaian Kontrol dan Aktuator

Rangkaian kontrol ini terdiri dari rangkaian saklar transistor dan *relay* sebagai aktuator dan mikrokontroler Arduino Uno sebagai kontroler utama. Rangkaian saklar transistor digunakan untuk mengendalikan *relay*. Transistor memiliki dua keadaan, yaitu saturasi dan *cut-off*. Ketika tidak ada tegangan yang melalui basis transistor, maka katup dari kolektor ke emitor akan ditutup sehingga arus tidak akan mengalir ke rangkaian *relay*. Hal ini yang disebut sebagai keadaan *cut-off*. Namun, jika terdapat tegangan yang melalui basis transistor, maka katup dari kolektor ke emitor akan dibuka sehingga arus akan mengalir ke rangkaian *relay*. Hal ini yang disebut transistor dalam keadaan saturasi. Tegangan minimal untuk saklar transistor dapat beroperasi adalah sekitar 0,7 V. Rangkaian *driver relay* selengkapnya dapat dilihat pada Gambar 30.

### 3) Perancangan Program Arduino

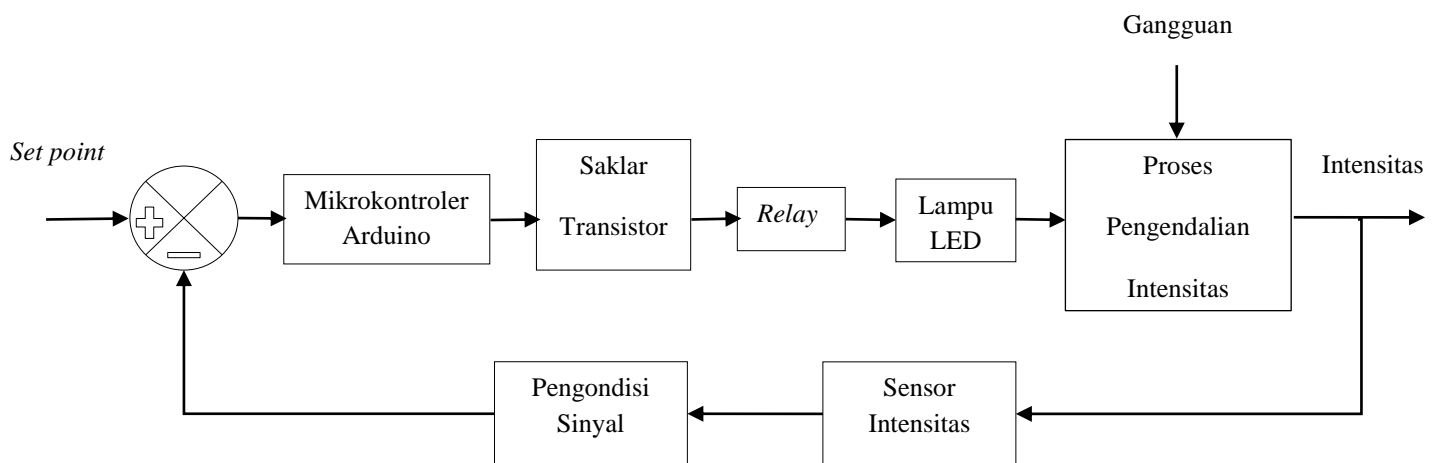
Untuk mengaktifkan *driver relay* yang berperan sebagai aktuator untuk mengatur LED *on* atau *off*, maka diperlukan suatu program untuk menjalankan perintah tersebut. Berikut *flowchart* dari program yang digunakan:



Gambar 21. Diagram alir program Arduino

#### 4) Prinsip Kerja Rangkaian Sistem Kontrol

Berdasarkan diagram blok pada Gambar 22 dapat dijelaskan bahwa terdapat dua masukan, yaitu tegangan *set point* dan tegangan sinyal *feedback* dari sensor. Besarnya tegangan dari sensor dapat berubah-ubah sesuai dengan perubahan intensitas cahaya yang dideteksi oleh sensor fotodiode. Lampu LED akan menyala sesuai dengan tegangan dan arus listrik yang melewati rangkaian kontrol.



Gambar 22. Diagram blok sistem kontrol intensitas cahaya

## 2. Tahap Pengujian Alat

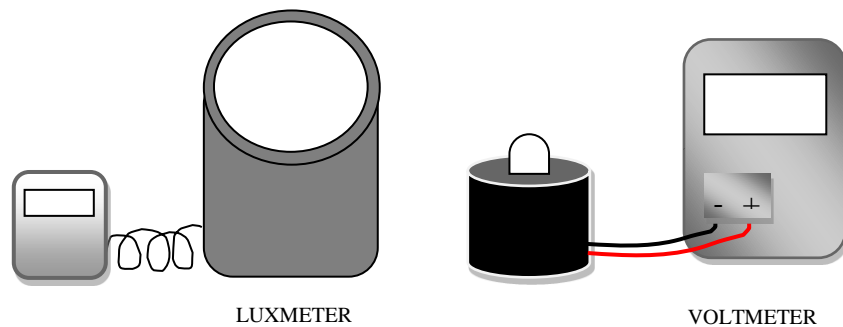
Tahap ini dilakukan untuk mengetahui apakah alat yang dibuat dapat digunakan untuk keperluan pengambilan data dan dapat bekerja secara optimal.

Pengujian alat dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut:

### a. Pengujian Sensor Fotodioda

Pengujian sensitivitas sensor fotodioda dilakukan untuk mengetahui perubahan arus terhadap perubahan intensitas cahaya pada fotodioda yang diubah menjadi tegangan dengan rangkaian *Transimpedance Amplifier* (TIA). Langkah-langkahnya adalah sebagai berikut:

- 1) Menyusun rangkaian seperti yang ditunjukkan pada Gambar 23.
- 2) Mengukur tegangan keluaran dari rangkaian fotodioda terhadap perubahan intensitas cahaya. Kemudian diperoleh data hubungan antara intensitas cahaya dengan tegangan keluaran.



Gambar 23. Rangkaian pengujian sensitivitas sensor fotodioda

### b. Pengujian Rangkaian Sistem Kontrol

Untuk mengetahui sistem yang dibuat telah mampu bekerja sesuai keinginan atau tidak, maka perlu dilakukan pengujian terhadap sistem secara keseluruhan. Pengujian sistem secara keseluruhan dilakukan dengan langkah-langkah berikut:

1. Memasang sensor di tengah *greenhouse*.

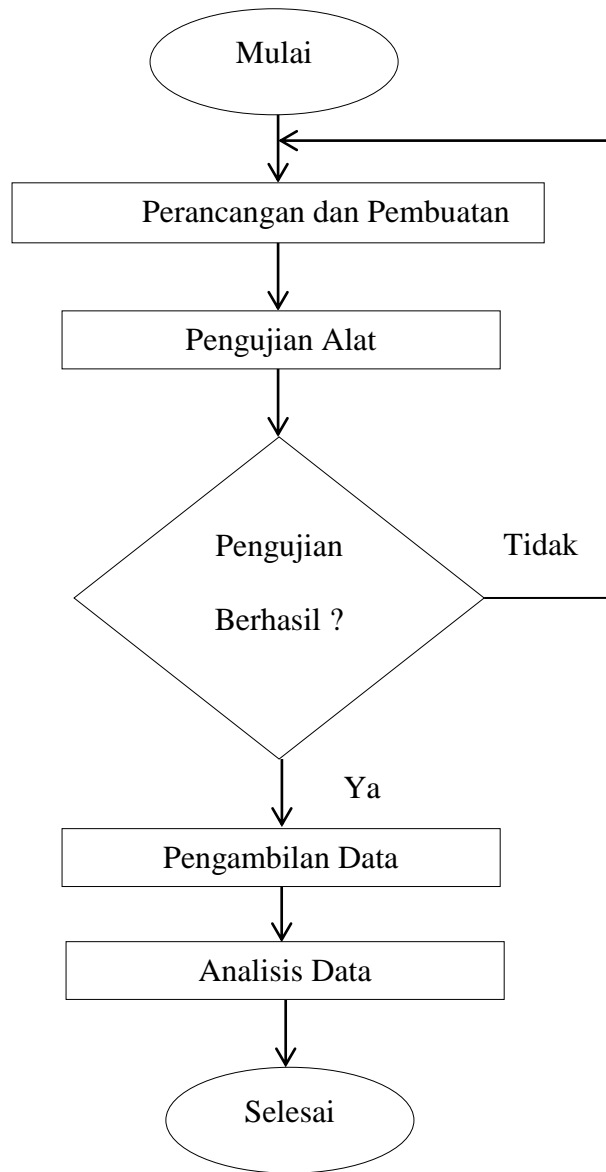
2. Memberi sumber daya pada rangkaian sensor dengan tegangan 15 V dan mikrokontroler Arduino Uno dengan tegangan 5 V.
3. Kemudian dilakukan pengujian dengan cara mengubah intensitas cahaya secara berulang-ulang.
4. Data yang ada tersimpan pada *SD Card* dan kemudian mencatatnya pada tabel.

#### **F. Teknik Analisis Data**

Langkah-langkah yang dilakukan untuk menganalisis data dalam penelitian ini adalah:

- 1) Menganalisis rangkaian sistem kontrol yang terdiri dari sensor fotodiode, aktuator, rangkaian pensaklaran dan pengondisi sinyal.
- 2) Merumuskan model dalam bentuk persamaan transformasi Laplace.
- 3) Mencari hubungan antara masukan dan keluaran tiap komponen lalu mem-*plot* grafik untuk memperoleh fungsi transfer dari masing-masing komponen.

### G. Diagram Alir Tahapan Penelitian



Gambar 24. Diagram Alir Penelitian

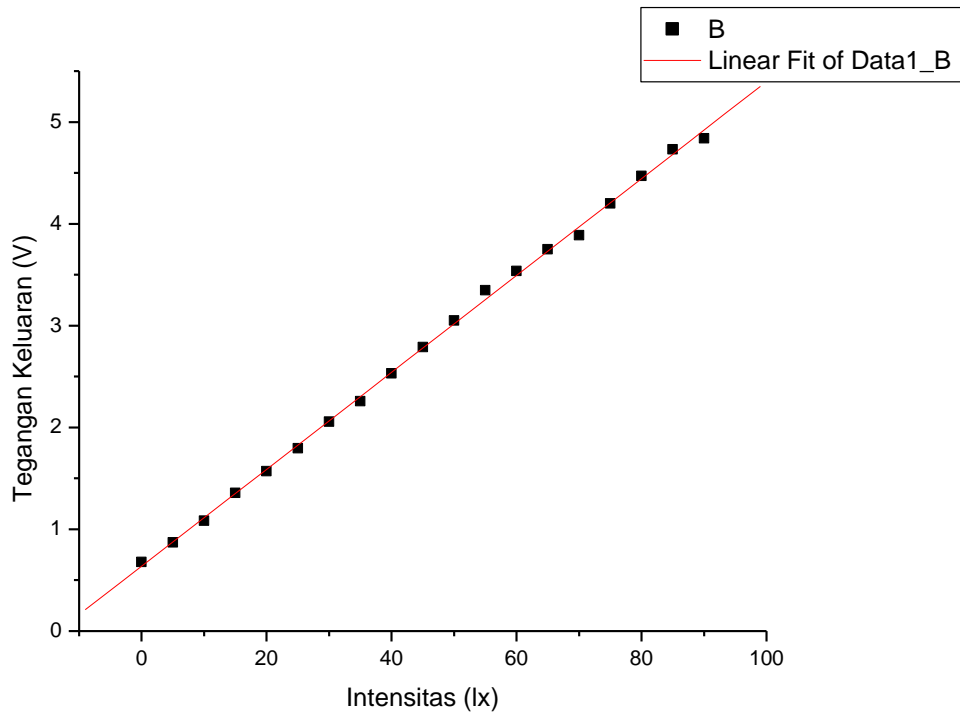
## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

### A. Karakteristik Fotodioda

Sensor fotodioda digunakan untuk mengukur intensitas cahaya di dalam *greenhouse* yang dikontrol. Sensor fotodioda adalah sebuah sensor yang mengubah cahaya menjadi arus. Arus yang dihasilkan fotodioda sangat kecil, namun dapat diperbesar dengan rangkaian penguat. *Transimpedance Amplifier* (TIA) adalah rangkaian yang dapat menguatkan arus lemah fotodioda dan mengubah arus optikal fotodioda tersebut menjadi tegangan.

Seperti pada Gambar 9, rangkaian ini terdiri dari penguat, resistor *feedback* dan kapasitor *feedback*. Impedansi dari penguat sendiri sangat besar sehingga diasumsikan tidak ada arus yang melewati penguat. Oleh karena itu, arus fotodioda hampir seluruhnya melewati resistor *feedback* yang terhubung dengan tegangan keluaran rangkaian sensor fotodioda. Kapasitansi masukan penguat dapat menyebabkan ketidakstabilan ketika dihubungkan dengan resistor *feedback*, sehingga digunakan kapasitor *feedback* untuk membuat lebih stabil. Fotodioda sendiri memiliki kapasitansi yang berpengaruh terhadap nilai keluarannya.

Pada rangkaian sensor fotodioda yang digunakan, tegangan keluaran dari rangkaian *Transimpedance Amplifier* dihubungkan dengan pembagi tegangan yang menghasilkan tegangan keluaran maksimal sebesar 5 V. Nilai tegangan keluaran sensor pada pembagi tegangan jika *diplot* dengan intensitas menghasilkan grafik sebagai berikut:



Gambar 25. Hubungan intensitas cahaya terhadap tegangan keluaran rangkaian sensor fotodioda

[29/12/2016 09:26 "/Graph2" (2457751)]

Linear Regression for Data1\_B:

$$Y = A + B * X$$

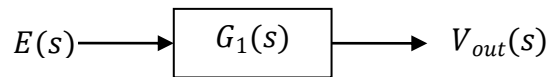
Parameter	Value	Error	
A	0,63741	0,01989	
B	0,04759	3,7758E-4	
R	SD	N	P
0,99947	0,04507	19	<0.0001

Berdasarkan grafik pada Gambar 25, nilai  $A$  merupakan nilai tegangan mula-mula dan  $B$  merupakan gradien atau nilai sensitivitas, yaitu  $(0,0476 \pm 0,0004) \text{ V/lx}$ .

## B. Analisis Rancang Bangun Alat

### 1. Blok Rangkaian Sensor Fotodioda

Fotodioda digunakan sebagai sensor yang mengubah intensitas cahaya yang dideteksi di dalam ruang yang dikontrol menjadi keluaran tegangan. Fotodioda dapat mendeteksi perubahan intensitas cahaya yang kemudian diubah menjadi arus yang lemah. Arus fotodioda tersebut diubah menjadi nilai tegangan menggunakan rangkaian *Transimpedance Amplifier* (TIA) dan selanjutnya masuk ke rangkaian pembagi tegangan.



Gambar 26. Diagram blok rangkaian sensor fotodioda

Berdasarkan kalibrasi yang dilakukan terhadap sensor fotodioda, diperoleh hubungan antara intensitas cahaya dengan tegangan keluaran rangkaian sensor bersifat linier, di mana semakin tinggi nilai intensitas cahaya, maka semakin besar nilai tegangan keluaran rangkaian sensor fotodioda.

Dari Gambar 25 diperoleh persamaan:

$$V_{out} = V_0 + m_1 E \quad (4.1)$$

di mana

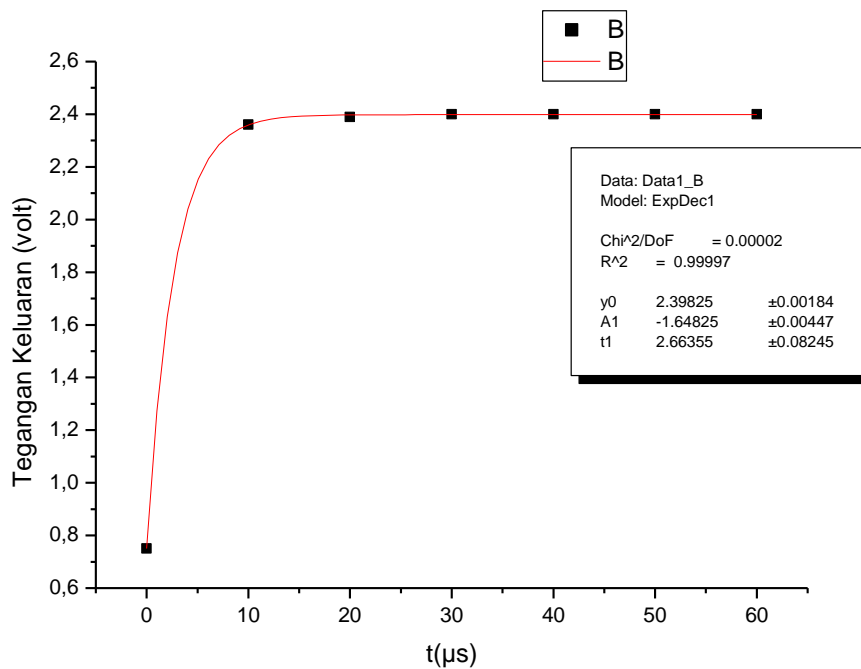
$V_{out}$  : tegangan keluaran rangkaian sensor (V)

$V_0$  : tegangan mula-mula (V)

$m_1$  : nilai sensitivitas sensor (V/lx)

$E$  : intensitas cahaya (lx).

Untuk menganalisis blok rangkaian sensor, maka dilakukan pengujian keluaran sensor terhadap waktu. Pengujian dilakukan dengan cara mengukur tegangan keluaran dari sensor ketika dalam keadaan gelap, yaitu 0 lx kemudian memberikan intensitas cahaya pada nilai tertentu dan selanjutnya mengukur lagi tegangan keluaran dari sensor. Berikut diperoleh grafik hasil uji intensitas yang diwakili oleh tegangan keluaran sensor sebagai fungsi waktu:



Gambar 27. Hasil pengujian tegangan keluaran rangkaian sensor sebagai fungsi waktu

Berdasarkan pengujian yang dilakukan, diperoleh hubungan antara intensitas dan waktu ( $t$ ), yaitu berupa fungsi eksponensial sehingga dapat ditulis dengan persamaan:

$$E(t) = E_0 + Ae^{-at} \quad (4.2)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (4.2) ke persamaan (4.1), maka diperoleh

$$\begin{aligned} V_{out}(t) &= V_0 + m_1(E_0 + Ae^{-at}) \\ &= V_0 + E_0m_1 + Ae^{-at}m_1 \end{aligned} \quad (4.3)$$

di mana persamaan (4.3) merupakan fungsi waktu. Kemudian dari persamaan (4.2) dan persamaan (4.3) diperoleh transformasi Laplace sebagai berikut:

$$E(s) = \frac{E_0}{s} + \frac{A}{(s+a)} \quad (4.4)$$

$$V_{out}(s) = \frac{V_0 + E_0m_1}{s} + \frac{Am_1}{s+a} \quad (4.5)$$

Kemudian dengan membandingkan transformasi Laplace keluaran dengan transformasi Laplace masukan diperoleh fungsi transfer dari blok sensor. Dengan menganggap keadaan mula-mula sama dengan nol, maka diperoleh persamaan:

$$G_1(s) = \frac{V_{out}(s)}{E(s)} = \frac{\frac{V_0 + E_0m_1}{s} + \frac{Am_1}{s+a}}{\frac{E_0}{s} + \frac{A}{s+a}} \quad (4.6)$$

$$G_1(s) = m_1 \quad (4.7)$$

Dari persamaan (4.7) diperoleh fungsi transfer diagram blok sensor berupa nilai sensitivitasnya, yaitu  $m_1 = (0,0476 \pm 0,0004) \text{ V/lx}$ .

## 2. Blok Mikrokontroler Arduino

Mikrokontroler Arduino digunakan sebagai komparator yang membandingkan nilai *set point* dengan nilai intensitas cahaya yang diwakili dengan nilai tegangan dari sensor fotodiode dan mikrokontroler Arduino merupakan sistem kontrol utama. *Input* tegangan dari sensor yang masuk ke Arduino berada pada rentang 0,74 V - 5,00 V, di mana nilai 0,74 V sama dengan intensitas sebesar 0 lx dan 5,00 V sama dengan intensitas sebesar 90 lx. *Set point* yang ditetapkan dalam program, yaitu 2 V yang setara dengan nilai 25 lx. Apabila *input* tegangan berada pada rentang (2-5) V di mana nilainya lebih besar dari *set point*, maka keluaran Arduino berupa logika 0 atau tegangan pada basis transistor mendekati 0 V. Namun, jika tegangan dari sensor berada di bawah nilai *set point* yang telah ditetapkan maka keluaran Arduino berupa logika 1 dan memberikan tegangan sebesar 4,44 V pada basis transistor, sehingga transistor dalam keadaan saturasi dan *relay* akan *ON*.

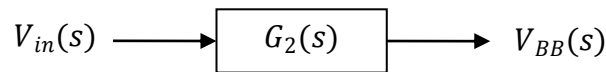
$$V_{BB}(t) = \begin{cases} 4,44 \text{ volt,} & \text{jika } V_{in} \leq 2 \text{ volt} \\ 0 \text{ volt,} & \text{jika } V_{in} > 2 \text{ volt} \end{cases} \quad (4.8)$$

Berdasarkan persamaan (4.8), kemudian diperoleh transformasi Laplace nya sebagai berikut:

$$V_{BB}(s) = \frac{4,44}{s} \quad (4.9)$$

sehingga diperoleh fungsi transfer dari diagram blok mikrokontroler Arduino sebagai berikut:

$$G_2(s) = \frac{V_{BB}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{K_1}{s} \quad (4.10)$$



Gambar 28. Diagram blok mikrokontroler Arduino

### 3. Blok Saklar Transistor

Transistor dalam rangkaian sistem kontrol ini digunakan sebagai *switch*. Transistor memiliki dua kondisi kerja, yaitu saturasi dan *cut-off*. Kondisi kerja transistor didasarkan pada banyaknya arus yang mengalir pada terminal basis transistor. Apabila pada terminal basis diberi tegangan maka arus akan mengalir. Tegangan basis ke emitor ( $V_{BE}$ ) setidaknya harus lebih besar dari 0,7 V, di mana tegangan basis transistor berasal dari keluaran mikrokontroler Arduino. Pengujian saklar transistor dilakukan berdasarkan hubungan karakter dari transistor terhadap keluaran mikrokontroler Arduino (*HIGH/LOW*).

Tabel 4. Hasil pengujian karakteristik transistor

No.	Kondisi keluaran mikrokontroler Arduino	$V_{BE}$ (V)	$V_{CE}$ (V)	$I_B$ (mA)	$V_B$ (V)	Kondisi kerja	Keadaan <i>switch</i> transistor	Keadaan Lampu LED
1.	<i>HIGH</i>	0,7	0,0778	0,3	0,908	Saturasi	<i>ON</i>	Menyala
2.	<i>LOW</i>	0,0039	11,89	0,01	0,0037	<i>Cut-off</i>	<i>OFF</i>	Mati

Jika keluaran mikrokontroler Arduino dalam kondisi *HIGH*, maka terdapat tegangan atau arus yang mengalir ke transistor. Tegangan atau arus yang mengalir ke terminal basis akan menyebabkan transistor dalam keadaan saturasi, di mana

arus yang dihubungkan ke terminal kolektor akan mengalir ke emitor. Terminal kolektor dan emitor seolah-olah terhubung singkat seperti saklar tertutup, sehingga lampu LED akan menyala. Arus yang mengalir ke terminal basis pada kondisi ini sebesar 0,3 mA dan tegangan kolektor-emitor sebesar 0,0778 V.

Pada kondisi *cut-off*, arus tidak mengalir ke basis transistor. Hal ini terjadi ketika keluaran mikrokontroler Arduino dalam kondisi *LOW*, sehingga menyebabkan terminal kolektor-emitor terputus dan seolah-olah seperti saklar terbuka. Arus yang mengalir ke terminal basis pada kondisi ini sebesar 0,01 mA dan tegangan kolektor-emitor sebesar 11,89 V.

Berdasarkan pengukuran yang telah dilakukan, diperoleh persamaan sebagai berikut:

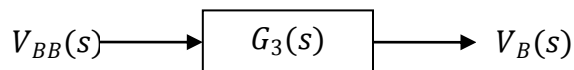
$$V_B(t) = \begin{cases} 0,908 \text{ volt,} & \text{jika } V_{BB} = 4,44 \text{ volt} \\ 0,0037 \text{ volt,} & \text{jika } V_{BB} = 0 \text{ volt} \end{cases} \quad (4.11)$$

Persamaan (4.11) dapat dibuat ke dalam bentuk transformasi Laplace sebagai berikut:

$$V_B(s) = \frac{V_{BB}(s)}{s} \quad (4.12)$$

Fungsi transfer untuk blok saklar transistor diperoleh seperti pada persamaan (4.13) berikut:

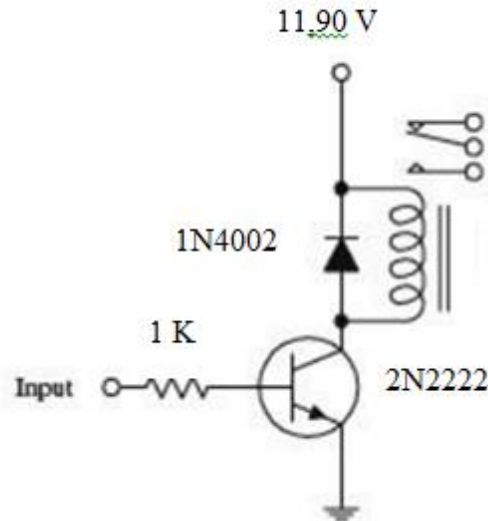
$$G_3(s) = \frac{V_B(s)}{V_{BB}(s)} = \frac{K_2}{s} \quad (4.13)$$



Gambar 29. Diagram blok saklar transistor

#### 4. Blok Relay

Relay yang digunakan dalam rangkaian sistem kontrol intensitas ini berfungsi untuk mengendalikan LED atau disebut sebagai aktuator. Relay yang digunakan dalam rangkaian ini adalah tipe SPDT dengan tegangan masukan sebesar 11,90 V dan kapasitas arus 10 A. Relay dipasang seri dengan terminal kolektor-emitor, sehingga apabila ada arus yang mengalir ke terminal basis maka arus dari kolektor ke emitor mengalir dan relay dalam keadaan ON. Dari hasil pengukuran diperoleh nilai hambatan relay sebesar 396 ohm, sehingga besarnya arus yang ditarik relay ( $I_{relay}$ ) sebesar 30 mA. Besarnya nilai arus pada relay mendekati nilai arus yang mengalir pada kolektor ( $I_C \approx I_{relay}$ ) dan hambatan kolektor merupakan hambatan relay.



Gambar 30. Rangkaian *driver relay*

$$V_{CC} = V_{CE} + V_{Relay} \quad (4.14)$$

Berdasarkan persamaan (4.14) untuk mendapatkan tegangan relay 12 V dengan sumber tegangan 11,90 V maka  $V_{CE}$  harus  $\approx 0$ . Hal ini menyebabkan transistor dalam keadaan saturasi dan *relay* akan *ON*. Sedangkan ketika tegangan maksimum berada di kaki kolektor ( $V_{CE}$ ) di mana  $V_{CE}$  sama dengan  $V_{CC}$ , yaitu 11,90 V, dengan nilai  $I_B = 0$  A dan  $I_C = 0$  A menyebabkan arus dari kolektor ke emitor tidak dapat mengalir dan *relay* dalam keadaan *OFF*.

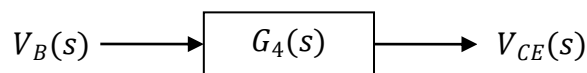
$$V_{CE}(t) = \begin{cases} 11,9 \text{ volt,} & \text{jika } V_B = 0 \text{ volt} \\ 0,08 \text{ volt,} & \text{jika } V_B = 0,908 \text{ volt} \end{cases} \quad (4.15)$$

Dari persamaan (4.15) dapat diperoleh bentuk transformasi Laplacinya, yaitu:

$$V_{CE}(s) = \frac{V_B(s)}{s} \quad (4.16)$$

Fungsi transfer untuk blok *relay* dapat ditentukan dengan membandingkan transformasi Laplace keluaran dan masukan dalam rangkaian.

$$G_4(s) = \frac{V_{CE}(s)}{V_B(s)} = \frac{K_3}{s} \quad (4.17)$$



Gambar 31. Diagram blok *relay*

## 5. Blok Lampu LED

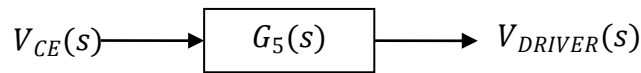
Lampu LED yang digunakan pada penelitian ini menghasilkan intensitas dengan satuan lux. Operasi lampu LED dikendalikan oleh rangkaian *relay* sebagai

aktuator yang dipengaruhi arus dari saklar transistor. Pada saat  $V_{CE}$  bernilai 0 V maka transistor dalam keadaan saturasi sehingga *switch relay* terbuka dan lampu LED akan *ON*, sedangkan pada saat  $V_{CE}$  bernilai 11,90 V maka transistor dalam keadaan *cut-off* dan *switch relay* akan tertutup sehingga lampu LED akan *OFF*.

$$V_{DRIVER} = \begin{cases} 0 \text{ volt,} & \text{jika } V_{CE} = 11,90 \text{ volt} \\ 17,25 \text{ volt,} & \text{jika } V_{CE} = 0 \text{ volt} \end{cases} \quad (4.18)$$

Dengan membandingkan transformasi Laplace keluaran dan masukannya, maka diperoleh fungsi transfer untuk diagram blok rangkaian LED sebagai berikut:

$$G_5(s) = \frac{V_{DRIVER}(s)}{V_{CE}(s)} = \frac{K_4}{s} \quad (4.19)$$



Gambar 32. Diagram blok lampu LED

## 6. Blok Proses Pengontrolan Intensitas Cahaya

Sistem kontrol intensitas cahaya ini menggunakan lampu LED untuk menambah intensitas cahaya di dalam *greenhouse*. Pada saat intensitas cahaya di dalam *greenhouse* kurang dari nilai *set point* yang ditentukan, maka *relay* akan mengalirkan arus sehingga LED akan menyala. Berdasarkan penelitian yang dilakukan, diperoleh hasil *plot* grafik yang menggambarkan proses kenaikan nilai intensitas cahaya seperti pada Gambar 27. Sehingga diperoleh persamaan eksponensial sebagai berikut:

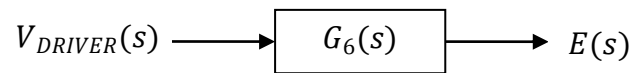
$$E(t) = E_0 + Ae^{-at} \quad (4.20)$$

Kemudian diperoleh persamaan transformasi Laplace seperti pada persamaan (4.19) berikut:

$$E(s) = \frac{E_0}{s} + \frac{A}{(s+a)} \quad (4.21)$$

Dengan mengasumsikan keadaan awal sama dengan nol, maka nilai  $E_0$  sama dengan nol sehingga diperoleh fungsi transfer sebagai berikut:

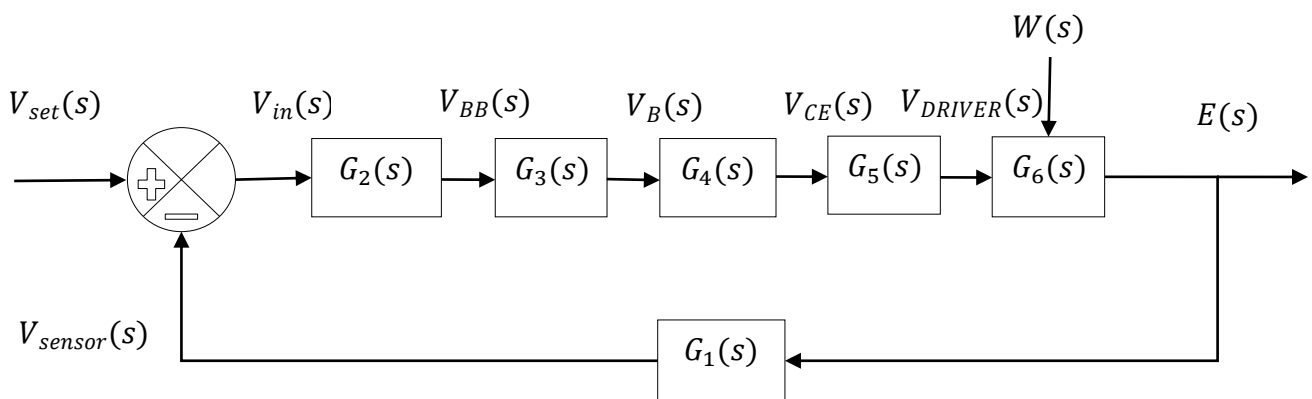
$$G_6 = \frac{E(s)}{V_{DRIVER}(s)} = \frac{A}{(s+a)V_{DRIVER}} \quad (4.22)$$



Gambar 33. Diagram blok konversi tegangan ke intensitas cahaya

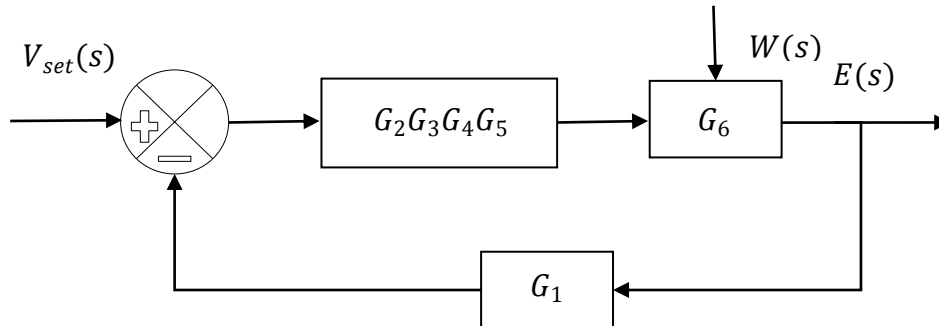
### C. Fungsi Transfer Total

Diagram blok dalam sistem kontrol ini secara keseluruhan dapat ditunjukkan pada Gambar 34.

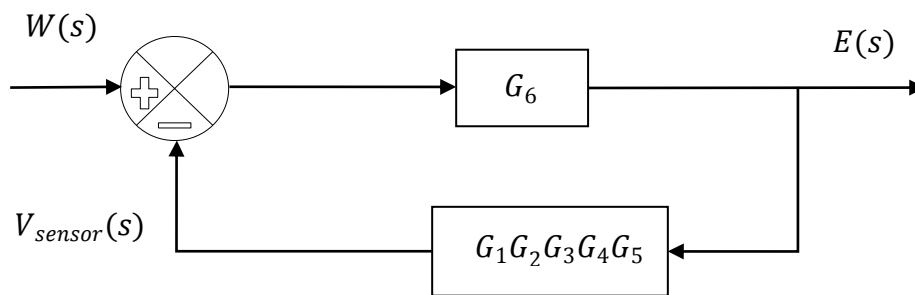


Gambar 34. Diagram blok sistem kontrol intensitas cahaya untuk tanaman selada di dalam *greenhouse*.

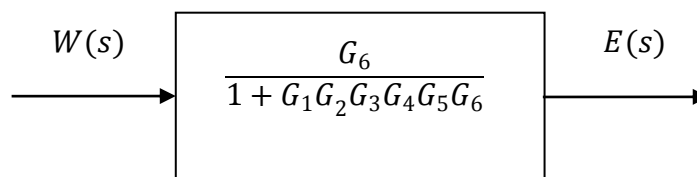
Diagram blok pada Gambar 34 dapat disederhanakan menggunakan aturan penyederhanaan diagram blok.



Gambar 35. Diagram blok hasil penggabungan 1



Gambar 36. Diagram blok hasil penggabungan 2



Gambar 37. Diagram blok total

Berdasarkan hasil penggabungan dan penyederhanaan diagram blok yang telah dilakukan, maka fungsi transfer total dari rangkaian dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

$$G(s) = \frac{E(s)}{W(s)} = \frac{G_6}{1+G_1G_2G_3G_4G_5G_6} \quad (4.23)$$

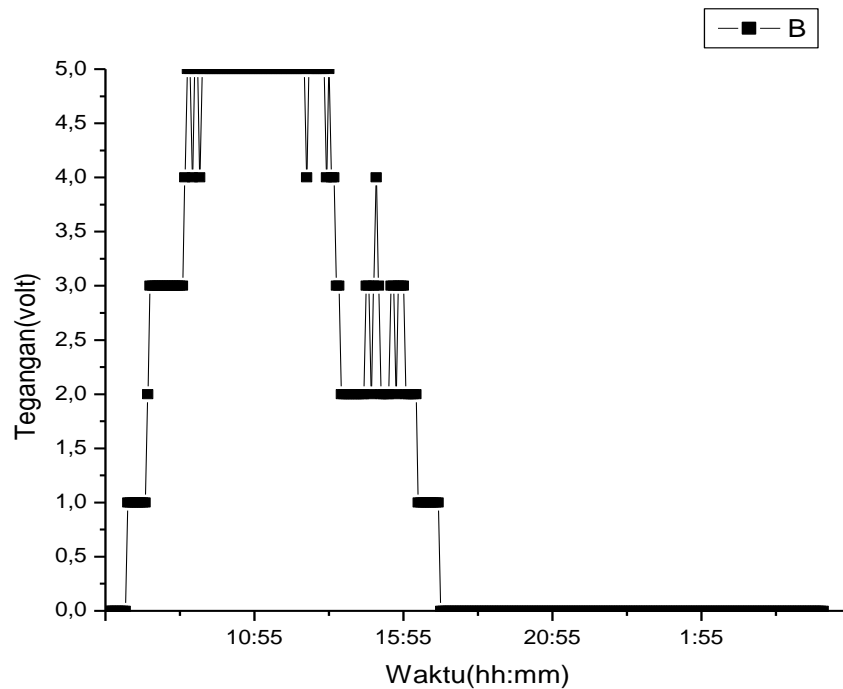
$$\frac{E(s)}{W(s)} = \frac{\frac{A}{(s+a)V_{DRIVER}}}{1+(m_1)\left(\frac{K_1}{s}\right)\left(\frac{K_2}{s}\right)\left(\frac{K_3}{s}\right)\left(\frac{K_4}{s}\right)\left(\frac{A}{(s+a)V_{DRIVER}}\right)} \quad (4.24)$$

Jika  $K = K_1K_2K_3K_4$ ,  $C = \frac{A}{V_{DRIVER}}$  dan nilai dari  $m_1$  dimasukkan ke persamaan (4.24), maka  $G(s)$  menjadi:

$$\frac{E(s)}{W(s)} = \frac{\frac{C}{(s+a)}}{1+(0,0476)\left(\frac{K}{s^4}\right)\left(\frac{C}{(s+a)}\right)} \quad (4.25)$$

#### D. Pengujian Alat

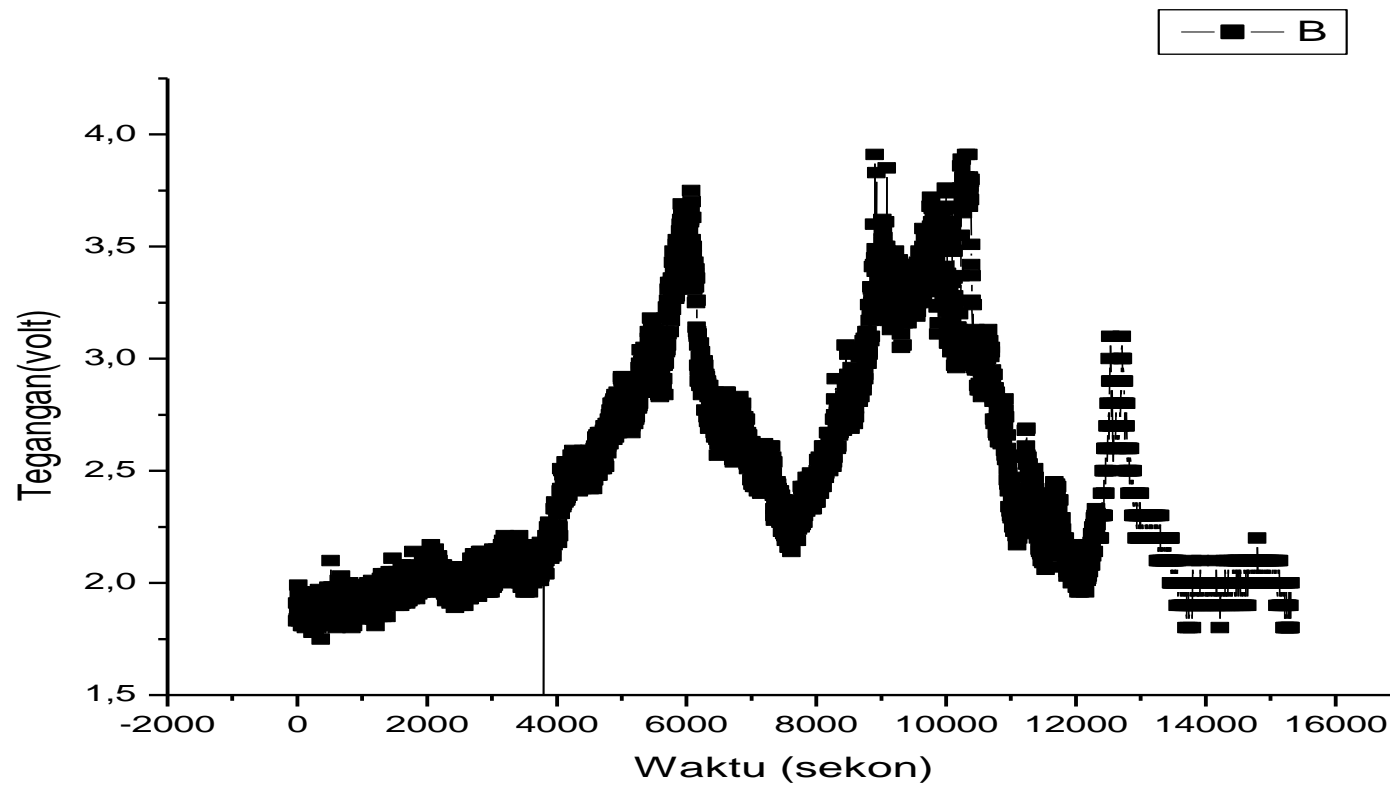
Pengujian alat dilakukan untuk mengetahui apakah sistem yang dibuat mampu bekerja sesuai perencanaan. Pengujian alat dilakukan di dalam *greenhouse* dengan melakukan pengukuran ketika tidak terdapat alat kontrol dan ketika alat kontrol dipasang di dalam *greenhouse*. Intensitas cahaya yang dideteksi oleh sensor diwakili dengan nilai tegangan keluaran rangkaian sensor dan dipenuhi kebutuhannya menggunakan lampu LED 3 watt berwarna biru sebanyak 4 buah. Sensor diletakkan di tengah ruang menghadap keatas dengan harapan mampu mendeteksi intensitas cahaya dari matahari maupun dari lampu LED, dan juga agar sensor tidak terhalang oleh daun selada yang tumbuh di dalam *greenhouse*.



Gambar 38. Grafik fluktuasi intensitas cahaya yang diwakili nilai tegangan di dalam *greenhouse* tanpa kontrol intensitas cahaya

Gambar 38 merupakan hasil *plot* dari fluktuasi intensitas cahaya dalam satu hari di dalam *greenhouse*, sebelum adanya kontrol intensitas. Intensitas cahaya mencapai nilai tertinggi, yaitu 5 V berkisar pada pukul 09.00 – 13.00, di mana pada waktu tersebut menandakan matahari mulai naik dan cahayanya sangat terik.

Intensitas cahaya yang menjadi nilai *set point* diwakili oleh nilai tegangan 2 V, di mana sistem aktif jika nilai intensitas yang dibaca sensor kurang dari nilai tersebut. Namun, sistem mati jika intensitas yang terbaca lebih dari nilai *set point* yang ditentukan. Hal ini karena sistem yang dibuat diharapkan mampu memenuhi kebutuhan cahaya yang diterima tanaman.



Gambar 39. Grafik intensitas cahaya di dalam *greenhouse* ketika adanya kontrol intensitas cahaya

Pengambilan data di dalam *greenhouse* dilakukan hanya selama 27 hari, dikarenakan *greenhouse* mengalami kerusakan karena hujan yang lebat dan angin yang kencang, sehingga pengambilan data dihentikan pada hari ke-27. Padahal waktu panen selada secara normal berkisar 35 hari. Walaupun demikian, pengaruh yang terjadi pada pertumbuhan tanaman selada antara yang dikontrol dengan yang tidak sudah dapat dilihat perbedaannya seperti pada Gambar 40 berikut ini:



(a)



(b)

Gambar 40. (a). Tanaman selada di dalam *greenhouse* yang dikontrol  
(b). Tanaman selada di dalam *greenhouse* yang tidak dikontrol

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan mengenai kontrol intensitas cahaya untuk tanaman selada dengan sistem hidroponik di dalam *greenhouse* diperoleh hasil seperti pada Tabel 5.

Tabel 5. Perbandingan hasil tanaman selada dari ketiga *greenhouse* yang diteliti

No.	<i>Greenhouse I</i>	<i>Greenhouse II</i>	<i>Greenhouse III</i>
1.	Ukuran rata-rata daun selada sebesar 5 cm	Ukuran rata-rata daun selada sebesar 2 cm	- (tanaman selada mati)
2.	Jumlah daun setiap pohon berjumlah 7-11 helai	Jumlah daun setiap pohon berjumlah 3-7 helai	- (tanaman selada mati)
3.	Warna daun hijau-kekuningan	Warna daun kuning dan hijau pucat	- (tanaman selada mati)

Keterangan: *Greenhouse I* → Terdapat alat kontrol intensitas cahaya, atap *greenhouse* diberi filter mika berwarna biru.  
*Greenhouse II* → Tidak terdapat alat kontrol intensitas cahaya, atap *greenhouse* diberi filter mika berwarna biru.  
*Greenhouse III* → Tidak terdapat alat kontrol intensitas cahaya, atap *greenhouse* terbuat dari plastik bening.

Hasil tanaman selada yang dikontrol intensitas cahayanya belum memenuhi standar tanaman selada yang dapat dikonsumsi karena kebutuhan cahaya tanaman masih belum terpenuhi secara maksimal mengenai intensitas dan spektrum warnanya akibat hujan yang terjadi secara terus-menerus selama penelitian dilakukan. Walaupun demikian, penelitian ini mengindikasikan bahwa cahaya sangat berpengaruh terhadap pertumbuhan dan perkembangan tanaman selada, baik cahaya yang berasal dari matahari maupun dibantu dengan cahaya tambahan seperti LED, dan juga mengenai spektrum warna yang dibutuhkan tanaman.

## BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

### A. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa:

1. Rancangan sistem kontrol intensitas cahaya untuk tanaman selada dengan sistem tanam hidroponik di dalam *greenhouse* telah diaktualisasikan menggunakan sumber cahaya berupa lampu LED 3 watt berwarna biru sebanyak 4 buah yang menghasilkan intensitas sebesar 25 lx di tengah ruang yang diwakili dengan nilai tegangan sebesar 2 V dan dideteksi oleh sensor cahaya fotodioda. Rangkaian sensor fotodioda menggunakan rangkaian *Transimpedance Amplifier* yang keluarannya berupa tegangan dan terhubung langsung ke Arduino. Nilai tegangan dari sensor fotodioda dibaca sebagai *input* Arduino dalam program yang telah dibuat, kemudian keluaran Arduino menghasilkan nilai *LOW* atau *HIGH* untuk mengendalikan rangkaian saklar transistor dan rangkaian *relay* yang terhubung ke rangkaian lampu LED.
2. Sistem kontrol yang telah dibuat merupakan sistem *closed-loop* dengan masukan berupa nilai tegangan *set point* dan keluaran berupa intensitas cahaya. Perbandingan dari keluaran dan masukan menghasilkan fungsi transfer sebagai berikut:

$$G(s) = \frac{E(s)}{W(s)} = \frac{\frac{C}{(s+a)}}{1 + (0,0476)\left(\frac{K}{s^4}\right)\left(\frac{C}{(s+a)}\right)}$$

3. Intensitas cahaya berpengaruh terhadap pertumbuhan tanaman selada di dalam *greenhouse*. Pertumbuhan tanaman selada yang dikontrol menunjukkan hasil bahwa ketika dilakukan kontrol cahaya dengan menambahkan sumber cahaya dari lampu LED tanaman selada dapat tumbuh daripada tanaman selada yang tidak dikontrol, yaitu selada yang dikontrol tumbuh dengan jumlah daun berkisar 7-11 helai dengan warna hijau-kekuningan, sedangkan tanaman selada yang tidak dikontrol jumlah daun berkisar 5 helai, ukuran daunnya lebih kecil dan layu bahkan sebagian besar mati.

## **B. Saran**

Penelitian yang dilakukan mengenai sistem kontrol ini masih banyak kekurangan, diantaranya:

1. Sebaran intensitas cahaya di dalam *greenhouse* masih belum merata. Untuk itu perlu dilakukan pengondisian dengan menambah jumlah lampu dan memperbaiki rangkaian agar keluaran intensitas dari setiap LED stabil dan merata.
2. Cahaya matahari yang digunakan untuk perbandingan sumber cahaya dengan LED masih terlalu besar dan penggunaan sistem masih belum optimal, sehingga untuk mengatasinya dapat dilakukan dengan mengganti sumber cahaya, menambah jumlah sumber cahaya, atau melakukan penelitian di dalam ruang tertutup (*indoor*). Kebutuhan spektrum cahaya yang dibutuhkan oleh tanaman juga sangat penting, sehingga untuk penelitian selanjutnya dapat dilakukan kombinasi spektrum warnanya.

## DAFTAR PUSTAKA

- Anonim. (2011). *3W High Power LED*. Diakses dari [www.wayjun.com](http://www.wayjun.com). pada tanggal 29 Februari 2016, Jam 11.00 WIB.
- Anonim. (2016). *Micro SD Card Module*. Diakses dari <http://store.fut-electronics.com/products/micro-sd-card-module>. pada tanggal 07 Desember 2016, Jam 2.20 WIB.
- Anonim. (2013). *What's the high power LED?*. Diakses dari <http://www.lednews.org/what-the-high-power-led-definition/>. pada 07 Desember 2016, Jam 08.20 WIB.
- Barta DJ, Tibbits TW, Bula RJ & Morrow, RC. *Evaluation of light emitting diode characteristics for a space-based plant irradiationsource*. *Adv Space Res.* 1992;12:141–9.
- Bolton, W. (2006). *Sistem Instrumentasi dan Sistem Kontrol*. (Alih bahasa: Soni Astranto, S.Si.). Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Both, A.J. (2000). *Some Thoughts on Supplemental Lighting for Greenhouse Crop Production*. Department of Plant Biology and Pathology. The State University of New Jersey. NJ 08901-8500.
- BPTP Yogyakarta. (2011). *Budidaya Selada*. Diakses dari [http://yogya.litbang.pertanian.go.id/ind/index.php?option=com\\_content&view=article&id=487:budidaya-selada&catid=14:alsin](http://yogya.litbang.pertanian.go.id/ind/index.php?option=com_content&view=article&id=487:budidaya-selada&catid=14:alsin). pada tanggal 04 Desember 2016, Jam 23.05 WIB.
- Brown, James W. (2015). *Light in the Greenhouse: How Much is Enough?*. Diakses dari <https://www.cropking.com/blog/light-greenhouse-how-much-enough>. pada tanggal 11 November 2015, Jam 13.04 WIB.
- Dea, Gusti D. A., Sugeng T., & Nugroho H. (2016). Pengaruh Penggunaan Beberapa Warna Lampu Neon Terhadap Pertumbuhan Tanaman Kailan (*Brassica oleraceae*) pada Sistem Hidroponik Indoor. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung* (Vol.5, No. 1). Hlm. 13- 24.
- Djuandi, Feri. (2011). *Pengenalan Arduino*. Diakses dari <http://tobuku.com/docs/Arduino-Pengenalan.pdf>. pada tanggal 06 Desember 2016, Jam 15.20 WIB.
- Eugeniy, E Mikhailov. (2012). *Chapter 10: Op-amp circuits for detectors, filters, and power applications*. The College of William and Mary.
- Fitter, A.H., & R. K. M. Hay. (1991). *Fisiologi Lingkungan Tanaman*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Gopal, Lakshmisree. (2016). *Opamp-Operational Amplifier*. Diakses dari <https://electrosome.com/opamp/>. pada tanggal 07 Desember 2016, Jam 07.20 WIB.
- Harris, D. (1988). *Hydroponis- The Complete Guide to Gardening without Soil*. London: New Holland Publishers Ltd.

- Hernandez, Ricardo. (2012). *Plant Lighting and Basics and Applications*. Tucson: The University of Arizona.
- Karlsson, Meriam. (2014). *Controlling the Greenhouse Environment*. University of Alaska, University of Alaska Fairbanks Cooperative Extension Service: Fairbanks, Alaska. Publication HGA-00336.
- Mattson, Neil. (2011). *Greenhouse Lighting*. New York: Cornell University
- Morris, Alan S. & Langari, Reza. (2013). *Measurement and Instrumentation: theory and application*. Oxford: Elsevier.
- Muneer, Sowbiya. et al. (2014). Influence of Green, Red and Blue Light Emitting Diodes on Multiprotein Complex Proteins and Photosynthetic Activity under Different Light Intensities in Lettuce Leaves (*Lactuca sativa* L.). *International Journal of Molecular Sciences*. 15(3): 4657–4670. Hlm. 1-5.
- Nave, C. R. (2012). *P-N Junction*. Diakses dari <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html>. pada tanggal 12 Desember 2015, Jam 11.17 WIB.
- Noer, Ahmad Awaluddin. (2015). Rancang Bangun Sistem Kontrol Intensitas Cahaya Dalam Ruang. *Skripsi*. FMIPA UNY.
- Ogata, Katsuhiko. (1995). *Teknik Kontrol Automatik jilid 1, diterjemahkan oleh Edi Leksono*. Jakarta: Erlangga.
- Ogata, Katsuhiko. (2003). *System Dynamics Fourth Edition*. New Jersey: Pearson.
- Rahardito, Raden. (2013). Peningkatan Pertumbuhan dan Hasil Panen Beberapa Tanaman Sayuran Daun Melalui Aplikasi Pupuk Kandang Berfortifikasi. *Skripsi*. Fakultas Pertanian IPB.
- Resh, H. M. (1998). *Hydroponic Food Production 5th Ed*. Santa Barbara: Woodbridge Press Publ.
- Rokim, M. Saiful. dkk. (2008). *Teknik Ototronik*. Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan.
- Rubatzky, V.E. & M. Yamaguchi. (1999). *Sayuran Dunia 2: Prinsip, Produksi, dan Gizi*. Edisi Kedua (diterjemahkan dari: *World Vegetables: Principles, Production and Nutritive Values*. 2nd ed. Penerjemah: C. Herison). Institut Teknologi Bandung. Bandung. 320 hal.
- Rukmana. (1994). *Bertanam Selada dan Andewi*. Yogyakarta: Kanisius.
- Runkle, E., J. Nelson & B. Bugbee. (2014). “LEDs vs. HPS Lamps: A Reality Check.” *Greenhouse Product News*6:54.
- Scherz, Paul & Monk, Simon. (2013). *Practical Electronics for Inventors Third Edition*. New York: McGraw-Hill.
- Smith, Mike. (2014). *A High Bandwidth, Low Noise Optical VLF Link*. Diakses dari <http://www.vlf.it/>. pada tanggal 07 Desember 2016, Jam 07.45 WIB.
- Sunardi. (2004). *Sistem Pengaturan Intensitas Cahaya pada Iklim Buatan dalam Rumah Kaca (Greenhouse)*. Semarang: UNDIP.

- Susila, A. D. (2013). *Sistem Hidroponik*. Departemen Agronomi dan Hortikultura. Fakultas Pertanian. Modul. IPB. Bogor. 20 hal.
- Yeh, N. & Chung, J.P. (2009). High-brightness LEDs – energy efficient lighting sources and their potential in indoor plant cultivation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13: 2175-2180.
- Yopi, Sukita. (2014). *Pengendali Intensitas Cahaya, Suhu, dan Kelembapan pada Rumah Kaca dengan Metode PID*. Bengkulu: Universitas Bengkulu.

# LAMPIRAN

**Lampiran 1. Data tegangan keluaran sensor terhadap perubahan intensitas cahaya**

Intensitas (lx)	Tegangan (Volt)
0	0.679
5	0.872
10	1.084
15	1.356
20	1.571
25	1.794
30	2.055
35	2.258
40	2.530
45	2.788
50	3.051
55	3.348
60	3.538
65	3.749
70	3.888
75	4.20
80	4.47
85	4.73
90	4.84

**Lampiran 2. Data fluktuasi intensitas cahaya di dalam *greenhouse* tanpa alat kontrol**

Waktu (hh:mm)	Tegangan Keluaran (Volt)	8:40	5	11:40	5
		8:45	5	11:45	5
6:00	0	8:50	4	11:50	5
6:05	0	8:55	5	11:55	5
6:10	0	9:00	5	12:00	5
6:15	0	9:05	4	12:05	5
6:20	0	9:10	5	12:10	5
6:25	0	9:15	5	12:15	5
6:30	0	9:20	5	12:20	5
6:35	0	9:25	5	12:25	5
6:40	1	9:30	5	12:30	5
6:45	1	9:35	5	12:35	5
6:50	1	9:40	5	12:40	4
6:55	1	9:45	5	12:45	5
7:00	1	9:50	5	12:50	5
7:05	1	9:55	5	12:55	5
7:10	1	10:00	5	13:00	5
7:15	1	10:05	5	13:05	5
7:20	2	10:10	5	13:10	5
7:25	3	10:15	5	13:15	5
7:30	3	10:20	5	13:20	4
7:35	3	10:25	5	13:25	5
7:40	3	10:30	5	13:30	4
7:45	3	10:35	5	13:35	4
7:50	3	10:40	5	13:40	3
7:55	3	10:45	5	13:45	3
8:00	3	10:50	5	13:50	2
8:05	3	10:55	5	13:55	2
8:10	3	11:00	5	14:00	2
8:15	3	11:05	5	14:05	2
8:20	3	11:10	5	14:10	2
8:25	3	11:15	5	14:15	2
8:30	3	11:20	5	14:20	2
8:35	4	11:25	5	14:25	2
		11:30	5	14:30	2
		11:35	5	14:35	2

14:40	3	17:55	0	21:10	0
14:45	3	18:00	0	21:15	0
14:50	2	18:05	0	21:20	0
14:55	3	18:10	0	21:25	0
15:00	4	18:15	0	21:30	0
15:05	3	18:20	0	21:35	0
15:10	2	18:25	0	21:40	0
15:15	2	18:30	0	21:45	0
15:20	2	18:35	0	21:50	0
15:25	2	18:40	0	21:55	0
15:30	3	18:45	0	22:00	0
15:35	3	18:50	0	22:05	0
15:40	2	18:55	0	22:10	0
15:45	3	19:00	0	22:15	0
15:50	3	19:05	0	22:20	0
15:55	3	19:10	0	22:25	0
16:00	2	19:15	0	22:30	0
16:05	2	19:20	0	22:35	0
16:10	2	19:25	0	22:40	0
16:15	2	19:30	0	22:45	0
16:20	2	19:35	0	22:50	0
16:25	1	19:40	0	22:55	0
16:30	1	19:45	0	23:00	0
16:35	1	19:50	0	23:05	0
16:40	1	19:55	0	23:10	0
16:45	1	20:00	0	23:15	0
16:50	1	20:05	0	23:20	0
16:55	1	20:10	0	23:25	0
17:00	1	20:15	0	23:30	0
17:05	1	20:20	0	23:35	0
17:10	0	20:25	0	23:40	0
17:15	0	20:30	0	23:45	0
17:20	0	20:35	0	23:50	0
17:25	0	20:40	0	23:55	0
17:30	0	20:45	0	0:00	0
17:35	0	20:50	0	0:05	0
17:40	0	20:55	0	0:10	0
17:45	0	21:00	0	0:15	0
17:50	0	21:05	0	0:20	0

0:25	0	3:10	0	5:55	0
0:30	0	3:15	0	6:00	0
0:35	0	3:20	0		
0:40	0	3:25	0		
0:45	0	3:30	0		
0:50	0	3:35	0		
0:55	0	3:40	0		
1:00	0	3:45	0		
1:05	0	3:50	0		
1:10	0	3:55	0		
1:15	0	4:00	0		
1:20	0	4:05	0		
1:25	0	4:10	0		
1:30	0	4:15	0		
1:35	0	4:20	0		
1:40	0	4:25	0		
1:45	0	4:30	0		
1:50	0	4:35	0		
1:55	0	4:40	0		
2:00	0	4:45	0		
2:05	0	4:50	0		
2:10	0	4:55	0		
2:15	0	5:00	0		
2:20	0	5:05	0		
2:25	0	5:10	0		
2:30	0	5:15	0		
2:35	0	5:20	0		
2:40	0	5:25	0		
2:45	0	5:30	0		
2:50	0	5:35	0		
2:55	0	5:40	0		
3:00	0	5:45	0		
3:05	0	5:50	0		

**Lampiran 3. Data fluktuasi intensitas cahaya di dalam *greenhouse* setelah dikontrol**

Waktu (sekon)	Tegangan (Volt)
0	1.83
5	1.91
10	1.84
15	1.99
20	1.87
25	1.94
30	1.85
35	1.86
40	1.96
45	1.83
50	1.88
55	1.84
60	1.95
65	1.89
70	1.84
75	1.81
80	1.87
85	1.88
90	1.81
95	1.86
100	1.92
105	1.84
110	1.86
115	1.94
120	1.9
125	1.85
130	1.93
135	1.85
140	1.8
145	1.88
150	1.83
155	1.89
160	1.83
165	1.92
170	1.87
175	1.9
180	1.91
185	1.9
190	1.85
195	1.85
200	1.91
205	1.84
210	1.82
215	1.85
220	1.9
225	1.93
230	1.86
235	1.9
240	1.78
245	1.94
250	1.93
255	1.91
260	1.89
265	1.84
270	1.78
275	1.84
280	1.81
285	1.84
290	1.84
295	1.96
300	1.96
305	1.83
310	1.8
315	1.9
320	1.89
325	1.81
330	1.91
335	1.97
340	1.94
345	1.85
350	1.89
355	1.96
360	1.95
365	1.75
370	1.83
375	1.87
380	1.83
385	1.84
390	1.91
395	1.87
400	1.95
405	1.85
410	1.87
415	1.89
420	1.93
425	1.95
430	1.89
435	1.89
440	1.84
445	1.84
450	1.9
455	1.94
460	1.96
465	1.88
470	1.82
475	1.89
480	1.98
485	1.91
490	1.96
495	1.89
500	1.93
505	1.87
510	1.92
515	1.91
520	2.1
525	1.82
530	1.97
535	1.97
540	1.84
545	1.98
550	1.81
555	1.94
560	1.98

565	1.93
570	1.86
575	1.92
580	1.84
585	1.92
590	1.94
595	1.86
600	1.94
605	1.9
610	1.8
615	1.88
620	1.85
625	1.9
630	1.9
635	1.88
640	2.01
645	1.95
650	1.92
655	1.93
660	1.96
665	1.97
670	1.96
675	1.91
680	2.03
685	1.92
690	1.84
695	1.92
700	1.87
705	1.98
710	1.84
715	1.88
720	1.88
725	1.95
730	1.92
735	1.96
740	1.89
745	1.96
750	1.87
755	1.86
760	1.89
765	1.93

770	1.86
775	1.99
780	1.88
785	1.92
790	1.92
795	1.86
800	1.84
805	2
810	1.85
815	1.87
820	1.96
825	1.95
830	1.83
835	1.94
840	1.8
845	1.99
850	1.89
855	1.87
860	1.94
865	1.81
870	1.86
875	1.96
880	1.87
885	1.9
890	1.94
895	1.9
900	1.94
905	1.88
910	1.89
915	1.94
920	1.97
925	1.91
930	1.99
935	1.85
940	1.93
945	1.94
950	1.96
955	1.89
960	1.9
965	1.89
970	1.87

975	1.95
980	1.99
985	1.89
990	1.9
995	1.87
1000	1.94
1005	1.89
1010	1.98
1015	1.87
1020	1.86
1025	1.91
1030	1.93
1035	1.94
1040	1.97
1045	1.97
1050	1.93
1055	1.96
1060	1.96
1065	1.9
1070	1.86
1075	1.93
1080	1.94
1085	1.96
1090	1.93
1095	2
1100	1.9
1105	1.89
1110	1.92
1115	1.93
1120	1.84
1125	1.92
1130	1.94
1135	1.84
1140	1.88
1145	1.91
1150	1.96
1155	1.9
1160	2.01
1165	1.87
1170	1.95
1175	1.97

1180	1.98
1185	1.84
1190	1.97
1195	1.84
1200	1.86
1205	1.81
1210	1.95
1215	1.94
1220	1.96
1225	1.91
1230	1.9
1235	1.97
1240	1.88
1245	1.86
1250	1.88
1255	1.94
1260	1.85
1265	1.99
1270	1.88
1275	1.95
1280	1.93
1285	1.94
1290	2.02
1295	1.87
1300	1.88
1305	1.88
1310	2.04
1315	1.85
1320	1.98
1325	1.93
1330	1.96
1335	2
1340	1.91
1345	1.98
1350	1.92
1355	1.93
1360	1.99
1365	1.9
1370	2.04
1375	1.85
1380	2.01

1385	1.96
1390	1.94
1395	1.96
1400	1.98
1405	1.97
1410	1.99
1415	1.95
1420	1.91
1425	2.05
1430	1.97
1435	1.94
1440	2
1445	2.01
1450	2.02
1455	1.98
1460	2.05
1465	1.94
1470	2.11
1475	1.97
1480	2.04
1485	1.92
1490	1.98
1495	2.01
1500	1.98
1505	1.98
1510	2
1515	1.91
1520	1.9
1525	1.90
1530	1.99
1535	1.96
1540	2.05
1545	2.02
1550	1.98
1555	1.96
1560	1.96
1565	2
1570	1.9
1575	2.04
1580	2
1585	1.9

1590	1.93
1595	1.93
1600	2.04
1605	2.01
1610	1.91
1615	2.08
1620	1.92
1625	1.98
1630	1.93
1635	1.94
1640	1.96
1645	1.98
1650	1.98
1655	2.04
1660	2.03
1665	1.92
1670	2.05
1675	2
1680	1.91
1685	1.96
1690	1.98
1695	1.92
1700	2.07
1705	1.96
1710	1.99
1715	1.92
1720	2.04
1725	1.93
1730	2.05
1735	2
1740	1.94
1745	2.01
1750	1.99
1755	1.93
1760	2.08
1765	2
1770	1.96
1775	1.99
1780	1.95
1785	2.04
1790	1.95

1795	2.14
1800	1.98
1805	1.99
1810	2.04
1815	2.01
1820	1.99
1825	2.02
1830	2.01
1835	1.93
1840	2.06
1845	2.05
1850	2.04
1855	2.07
1860	2.04
1865	1.95
1870	1.97
1875	2.03
1880	2.05
1885	2.02
1890	2
1895	2.06
1900	1.97
1905	2.03
1910	1.96
1915	2.07
1920	1.96
1925	2.05
1930	2.07
1935	2
1940	1.99
1945	2.11
1950	2.02
1955	1.98
1960	1.97
1965	2.09
1970	1.96
1975	2.07
1980	2.01
1985	1.99
1990	2.06
1995	2.05

2000	2.03
2005	1.99
2010	1.98
2015	2.08
2020	2.02
2025	2.12
2030	2.13
2035	2.1
2040	2.01
2045	2.06
2050	2.05
2055	1.96
2060	2.17
2065	1.98
2070	2.06
2075	2.02
2080	2.13
2085	2.09
2090	2.02
2095	2.06
2100	2.1
2105	2.04
2110	2.04
2115	2
2120	2.15
2125	2.04
2130	2.06
2135	2.09
2140	2.01
2145	2.08
2150	2.06
2155	2.01
2160	2.03
2165	2.04
2170	2.04
2175	2.12
2180	2.1
2185	2.06
2190	2.01
2195	2.02
2200	2.05

2205	1.99
2210	2.08
2215	2
2220	1.99
2225	1.98
2230	2.01
2235	1.96
2240	2.02
2245	2.01
2250	2.08
2255	2.06
2260	1.99
2265	2.01
2270	2.04
2275	2.03
2280	1.95
2285	2.06
2290	1.95
2295	1.99
2300	1.92
2305	2.03
2310	1.94
2315	1.95
2320	1.97
2325	2.03
2330	1.96
2335	1.95
2340	2.04
2345	2.03
2350	2
2355	1.99
2360	2
2365	1.91
2370	2.05
2375	1.95
2380	2
2385	1.99
2390	1.92
2395	2.03
2400	1.96
2405	2.07

2410	1.94
2415	1.96
2420	1.99
2425	2.01
2430	2.01
2435	1.89
2440	1.95
2445	2.06
2450	1.9
2455	2.04
2460	1.93
2465	2.07
2470	1.93
2475	2.03
2480	1.98
2485	1.98
2490	1.95
2495	2.06
2500	1.99
2505	2.04
2510	1.98
2515	2.04
2520	1.9
2525	1.93
2530	1.93
2535	2.05
2540	1.91
2545	2.05
2550	1.96
2555	2.07
2560	1.9
2565	2.06
2570	1.98
2575	2.01
2580	1.9
2585	2.02
2590	2.05
2595	2.02
2600	2.04
2605	1.96
2610	1.98

2615	2.02
2620	1.99
2625	2.05
2630	1.95
2635	2.02
2640	1.94
2645	2.05
2650	1.93
2655	1.96
2660	1.93
2665	2.06
2670	2.03
2675	1.99
2680	2.05
2685	2.11
2690	2.07
2695	2.07
2700	2
2705	2.03
2710	1.97
2715	2.05
2720	2.11
2725	2.05
2730	2.13
2735	2.09
2740	2.11
2745	2.07
2750	2.11
2755	2.13
2760	2.1
2765	1.99
2770	1.99
2775	2.09
2780	2.04
2785	1.94
2790	2.09
2795	2
2800	2.05
2805	1.97
2810	2.05
2815	2.1

2820	1.97
2825	2.14
2830	2.04
2835	1.97
2840	2.14
2845	1.97
2850	2.06
2855	2.07
2860	1.99
2865	2.12
2870	1.99
2875	2.07
2880	2.01
2885	1.96
2890	1.98
2895	2
2900	2
2905	1.96
2910	2.13
2915	1.99
2920	2
2925	2.05
2930	2
2935	2.04
2940	2.11
2945	1.96
2950	2.02
2955	1.96
2960	2.1
2965	2.07
2970	2.03
2975	2.08
2980	2.04
2985	1.96
2990	2
2995	2.03
3000	2.11
3005	2.04
3010	1.98
3015	1.98
3020	1.99

3025	2.15
3030	1.99
3035	2.11
3040	2.07
3045	2.02
3050	2.12
3055	2.03
3060	2.14
3065	2.02
3070	2.06
3075	2.07
3080	2.01
3085	2.15
3090	2.07
3095	2.11
3100	2.14
3105	2.08
3110	2.14
3115	2.08
3120	2.09
3125	2.07
3130	2.12
3135	2.1
3140	2.15
3145	2.08
3150	2.07
3155	2.11
3160	2.17
3165	2.07
3170	2.1
3175	2.15
3180	2.19
3185	2.09
3190	2.13
3195	2.09
3200	2.16
3205	2.21
3210	2.18
3215	2.09
3220	2.17
3225	2.16

3230	2.05
3235	2.17
3240	2.11
3245	2.18
3250	2.05
3255	2.06
3260	2.09
3265	2.01
3270	2.03
3275	2.04
3280	2.03
3285	2.08
3290	2.12
3295	2.08
3300	2.11
3305	2.12
3310	2.03
3315	2
3320	2.12
3325	2.14
3330	2.02
3335	2.14
3340	2.07
3345	2.16
3350	2.17
3355	2.12
3360	2.09
3365	2.15
3370	2.01
3375	2.14
3380	2.1
3385	2.01
3390	2.07
3395	2.03
3400	2.06
3405	2.11
3410	2.07
3415	2.14
3420	2.09
3425	2.21
3430	2.01

3435	2
3440	2.11
3445	2.02
3450	2.11
3455	2.02
3460	2
3465	1.98
3470	2.14
3475	1.98
3480	2.02
3485	2.05
3490	2.04
3495	1.99
3500	2.02
3505	1.96
3510	2.1
3515	2.03
3520	2.01
3525	1.96
3530	2.12
3535	2.06
3540	2.04
3545	2.02
3550	1.97
3555	2.17
3560	1.97
3565	2.06
3570	1.96
3575	2.15
3580	2.02
3585	2.06
3590	2.12
3595	2.15
3600	2.01
3605	2.01
3610	2.16
3615	2.09
3620	2.01
3625	2.06
3630	2.12
3635	2.02

3640	2
3645	2.08
3650	2.1
3655	2.11
3660	2.04
3665	2.14
3670	2.07
3675	2.04
3680	2.07
3685	2.05
3690	2.03
3695	2.06
3700	2.15
3705	2.14
3710	2.11
3715	2.01
3720	2.01
3725	2.17
3730	2.07
3735	2.08
3740	2.01
3745	2.01
3750	2.03
3755	2.12
3760	2.18
3765	2.17
3770	2.17
3775	2.16
3780	2.12
3785	2.17
3790	2.17
3795	1.03
3800	2.07
3805	2.15
3810	2.05
3815	2.04
3820	2.1
3825	2.04
3830	2.1
3835	2.13
3840	2.16

3845	2.21
3850	2.14
3855	2.13
3860	2.12
3865	2.14
3870	2.25
3875	2.22
3880	2.22
3885	2.27
3890	2.25
3895	2.19
3900	2.11
3905	2.12
3910	2.19
3915	2.21
3920	2.22
3925	2.19
3930	2.15
3935	2.23
3940	2.12
3945	2.2
3950	2.21
3955	2.17
3960	2.25
3965	2.22
3970	2.33
3975	2.21
3980	2.36
3985	2.23
3990	2.33
3995	2.24
4000	2.22
4005	2.35
4010	2.2
4015	2.31
4020	2.26
4025	2.18
4030	2.25
4035	2.32
4040	2.21
4045	2.33

4050	2.32
4055	2.32
4060	2.31
4065	2.41
4070	2.42
4075	2.51
4080	2.4
4085	2.5
4090	2.34
4095	2.35
4100	2.5
4105	2.48
4110	2.43
4115	2.48
4120	2.48
4125	2.36
4130	2.47
4135	2.37
4140	2.54
4145	2.45
4150	2.37
4155	2.38
4160	2.5
4165	2.54
4170	2.47
4175	2.44
4180	2.39
4185	2.48
4190	2.52
4195	2.54
4200	2.53
4205	2.49
4210	2.54
4215	2.44
4220	2.42
4225	2.52
4230	2.48
4235	2.57
4240	2.48
4245	2.46
4250	2.48

4255	2.42
4260	2.59
4265	2.47
4270	2.42
4275	2.47
4280	2.47
4285	2.52
4290	2.45
4295	2.48
4300	2.43
4305	2.57
4310	2.49
4315	2.44
4320	2.42
4325	2.48
4330	2.49
4335	2.45
4340	2.41
4345	2.52
4350	2.53
4355	2.42
4360	2.57
4365	2.49
4370	2.44
4375	2.46
4380	2.54
4385	2.56
4390	2.47
4395	2.55
4400	2.42
4405	2.56
4410	2.59
4415	2.48
4420	2.43
4425	2.58
4430	2.55
4435	2.54
4440	2.49
4445	2.45
4450	2.43
4455	2.52

4460	2.45
4465	2.47
4470	2.47
4475	2.5
4480	2.45
4485	2.46
4490	2.46
4495	2.46
4500	2.52
4505	2.59
4510	2.42
4515	2.51
4520	2.42
4525	2.5
4530	2.53
4535	2.43
4540	2.54
4545	2.57
4550	2.46
4555	2.53
4560	2.57
4565	2.42
4570	2.46
4575	2.55
4580	2.46
4585	2.6
4590	2.56
4595	2.61
4600	2.59
4605	2.52
4610	2.6
4615	2.65
4620	2.48
4625	2.48
4630	2.66
4635	2.57
4640	2.59
4645	2.48
4650	2.61
4655	2.67
4660	2.56

4665	2.57
4670	2.67
4675	2.63
4680	2.58
4685	2.66
4690	2.51
4695	2.66
4700	2.6
4705	2.67
4710	2.54
4715	2.51
4720	2.55
4725	2.56
4730	2.68
4735	2.7
4740	2.53
4745	2.52
4750	2.64
4755	2.59
4760	2.7
4765	2.61
4770	2.59
4775	2.71
4780	2.58
4785	2.61
4790	2.71
4795	2.65
4800	2.62
4805	2.73
4810	2.68
4815	2.62
4820	2.73
4825	2.75
4830	2.77
4835	2.72
4840	2.7
4845	2.76
4850	2.8
4855	2.77
4860	2.8
4865	2.75

4870	2.64
4875	2.8
4880	2.81
4885	2.74
4890	2.82
4895	2.65
4900	2.79
4905	2.83
4910	2.84
4915	2.76
4920	2.73
4925	2.67
4930	2.69
4935	2.75
4940	2.85
4945	2.74
4950	2.67
4955	2.78
4960	2.72
4965	2.75
4970	2.84
4975	2.74
4980	2.72
4985	2.72
4990	2.72
4995	2.83
5000	2.71
5005	2.92
5010	2.91
5015	2.91
5020	2.9
5025	2.91
5030	2.85
5035	2.89
5040	2.92
5045	2.86
5050	2.73
5055	2.89
5060	2.76
5065	2.73
5070	2.9

5075	2.86
5080	2.91
5085	2.72
5090	2.79
5095	2.78
5100	2.76
5105	2.72
5110	2.71
5115	2.87
5120	2.72
5125	2.7
5130	2.89
5135	2.84
5140	2.79
5145	2.75
5150	2.7
5155	2.67
5160	2.82
5165	2.87
5170	2.8
5175	2.78
5180	2.81
5185	2.8
5190	2.91
5195	2.71
5200	2.87
5205	2.84
5210	2.73
5215	2.91
5220	2.74
5225	2.88
5230	2.86
5235	2.8
5240	2.85
5245	2.91
5250	2.78
5255	2.78
5260	2.79
5265	2.9
5270	2.8
5275	2.96

5280	2.86
5285	2.89
5290	2.98
5295	2.93
5300	3.04
5305	2.86
5310	2.92
5315	2.85
5320	2.85
5325	2.99
5330	2.91
5335	2.93
5340	2.88
5345	2.93
5350	3.02
5355	3.05
5360	2.85
5365	3.01
5370	2.89
5375	3.01
5380	2.91
5385	2.94
5390	3.02
5395	2.91
5400	2.93
5405	3.04
5410	3.03
5415	3.01
5420	3.09
5425	3.12
5430	3.11
5435	2.98
5440	3.11
5445	3.04
5450	3.07
5455	3.18
5460	3.04
5465	3.11
5470	3.15
5475	3.07
5480	3.02

5485	3.05
5490	3.13
5495	2.98
5500	3.13
5505	3.01
5510	3.08
5515	2.9
5520	2.97
5525	3.01
5530	3.05
5535	2.91
5540	3.06
5545	3.05
5550	2.95
5555	3.04
5560	2.89
5565	2.88
5570	2.89
5575	2.95
5580	2.84
5585	2.98
5590	3.02
5595	2.83
5600	3.02
5605	2.98
5610	2.93
5615	3.05
5620	3
5625	3.06
5630	2.88
5635	2.97
5640	3.03
5645	2.91
5650	2.97
5655	2.84
5660	3.02
5665	3.03
5670	2.98
5675	3.12
5680	3.18
5685	3.03

5690	3.04
5695	3.06
5700	3.23
5705	3.06
5710	3.11
5715	3.2
5720	3.26
5725	3.24
5730	3.31
5735	3.34
5740	3.12
5745	3.2
5750	3.21
5755	3.2
5760	3.17
5765	3.24
5770	3.34
5775	3.36
5780	3.22
5785	3.3
5790	3.3
5795	3.43
5800	3.48
5805	3.27
5810	3.4
5815	3.43
5820	3.32
5825	3.46
5830	3.27
5835	3.41
5840	3.28
5845	3.39
5850	3.53
5855	3.51
5860	3.45
5865	3.41
5870	3.5
5875	3.48
5880	3.42
5885	3.43
5890	3.36

5895	3.47
5900	3.57
5905	3.46
5910	3.6
5915	3.55
5920	3.62
5925	3.58
5930	3.69
5935	3.46
5940	3.66
5945	3.46
5950	3.58
5955	3.64
5960	3.54
5965	3.39
5970	3.43
5975	3.44
5980	3.54
5985	3.52
5990	3.34
5995	3.33
6000	3.38
6005	3.46
6010	3.35
6015	3.48
6020	3.47
6025	3.42
6030	3.49
6035	3.44
6040	3.57
6045	3.45
6050	3.52
6055	3.62
6060	3.61
6065	3.66
6070	3.75
6075	3.52
6080	3.7
6085	3.53
6090	3.63
6095	3.5

6100	3.46
6105	3.31
6110	3.35
6115	3.32
6120	3.43
6125	3.32
6130	3.38
6135	3.32
6140	3.4
6145	3.36
6150	3.25
6155	3.26
6160	3.14
6165	3.12
6170	3.1
6175	3.11
6180	2.97
6185	3.06
6190	2.9
6195	2.95
6200	2.91
6205	3.07
6210	3.01
6215	2.89
6220	2.88
6225	3.03
6230	2.9
6235	2.96
6240	2.98
6245	2.84
6250	2.98
6255	2.85
6260	2.88
6265	2.99
6270	2.93
6275	2.97
6280	2.88
6285	2.9
6290	2.93
6295	2.77
6300	2.92

6305	2.92
6310	2.9
6315	2.89
6320	2.9
6325	2.74
6330	2.88
6335	2.72
6340	2.85
6345	2.83
6350	2.88
6355	2.69
6360	2.73
6365	2.84
6370	2.79
6375	2.81
6380	2.77
6385	2.82
6390	2.73
6395	2.78
6400	2.73
6405	2.83
6410	2.78
6415	2.74
6420	2.79
6425	2.77
6430	2.71
6435	2.85
6440	2.67
6445	2.65
6450	2.67
6455	2.72
6460	2.66
6465	2.72
6470	2.74
6475	2.64
6480	2.71
6485	2.66
6490	2.57
6495	2.62
6500	2.69
6505	2.65

6510	2.61
6515	2.67
6520	2.75
6525	2.67
6530	2.64
6535	2.69
6540	2.63
6545	2.69
6550	2.65
6555	2.66
6560	2.83
6565	2.67
6570	2.83
6575	2.84
6580	2.84
6585	2.77
6590	2.74
6595	2.78
6600	2.78
6605	2.85
6610	2.78
6615	2.79
6620	2.85
6625	2.66
6630	2.76
6635	2.65
6640	2.73
6645	2.68
6650	2.77
6655	2.72
6660	2.63
6665	2.67
6670	2.73
6675	2.79
6680	2.63
6685	2.65
6690	2.77
6695	2.59
6700	2.6
6705	2.7
6710	2.58

6715	2.74
6720	2.55
6725	2.61
6730	2.54
6735	2.7
6740	2.6
6745	2.59
6750	2.58
6755	2.67
6760	2.56
6765	2.69
6770	2.71
6775	2.76
6780	2.67
6785	2.8
6790	2.7
6795	2.6
6800	2.77
6805	2.78
6810	2.81
6815	2.83
6820	2.68
6825	2.73
6830	2.62
6835	2.7
6840	2.75
6845	2.63
6850	2.78
6855	2.8
6860	2.75
6865	2.65
6870	2.68
6875	2.6
6880	2.65
6885	2.73
6890	2.74
6895	2.55
6900	2.7
6905	2.63
6910	2.65
6915	2.59

6920	2.73
6925	2.58
6930	2.58
6935	2.67
6940	2.53
6945	2.56
6950	2.51
6955	2.66
6960	2.58
6965	2.61
6970	2.52
6975	2.52
6980	2.53
6985	2.61
6990	2.63
6995	2.53
7000	2.46
7005	2.63
7010	2.61
7015	2.44
7020	2.59
7025	2.58
7030	2.49
7035	2.58
7040	2.43
7045	2.44
7050	2.56
7055	2.44
7060	2.46
7065	2.5
7070	2.43
7075	2.52
7080	2.53
7085	2.5
7090	2.54
7095	2.53
7100	2.41
7105	2.51
7110	2.44
7115	2.57
7120	2.47

7125	2.47
7130	2.51
7135	2.47
7140	2.47
7145	2.58
7150	2.4
7155	2.43
7160	2.54
7165	2.45
7170	2.61
7175	2.49
7180	2.43
7185	2.53
7190	2.48
7195	2.46
7200	2.62
7205	2.5
7210	2.44
7215	2.56
7220	2.6
7225	2.45
7230	2.45
7235	2.55
7240	2.5
7245	2.47
7250	2.53
7255	2.53
7260	2.52
7265	2.52
7270	2.58
7275	2.58
7280	2.58
7285	2.44
7290	2.61
7295	2.53
7300	2.51
7305	2.61
7310	2.52
7315	2.47
7320	2.56
7325	2.43

7330	2.49
7335	2.54
7340	2.54
7345	2.42
7350	2.39
7355	2.3
7360	2.33
7365	2.28
7370	2.36
7375	2.36
7380	2.38
7385	2.35
7390	2.45
7395	2.36
7400	2.44
7405	2.42
7410	2.39
7415	2.38
7420	2.33
7425	2.37
7430	2.36
7435	2.39
7440	2.41
7445	2.28
7450	2.27
7455	2.39
7460	2.35
7465	2.28
7470	2.36
7475	2.23
7480	2.24
7485	2.37
7490	2.3
7495	2.33
7500	2.26
7505	2.22
7510	2.32
7515	2.23
7520	2.27
7525	2.21
7530	2.19

7535	2.33
7540	2.36
7545	2.24
7550	2.29
7555	2.33
7560	2.28
7565	2.25
7570	2.22
7575	2.32
7580	2.16
7585	2.16
7590	2.19
7595	2.23
7600	2.18
7605	2.17
7610	2.32
7615	2.14
7620	2.23
7625	2.22
7630	2.3
7635	2.28
7640	2.22
7645	2.29
7650	2.24
7655	2.28
7660	2.29
7665	2.28
7670	2.33
7675	2.19
7680	2.2
7685	2.32
7690	2.25
7695	2.31
7700	2.19
7705	2.3
7710	2.35
7715	2.24
7720	2.24
7725	2.31
7730	2.29
7735	2.28

7740	2.37
7745	2.3
7750	2.36
7755	2.27
7760	2.25
7765	2.28
7770	2.31
7775	2.26
7780	2.43
7785	2.42
7790	2.31
7795	2.35
7800	2.4
7805	2.27
7810	2.42
7815	2.3
7820	2.43
7825	2.39
7830	2.37
7835	2.39
7840	2.35
7845	2.37
7850	2.32
7855	2.47
7860	2.37
7865	2.35
7870	2.38
7875	2.4
7880	2.38
7885	2.4
7890	2.39
7895	2.34
7900	2.47
7905	2.35
7910	2.4
7915	2.39
7920	2.42
7925	2.49
7930	2.33
7935	2.34
7940	2.45

7945	2.33
7950	2.48
7955	2.45
7960	2.37
7965	2.42
7970	2.36
7975	2.46
7980	2.42
7985	2.48
7990	2.36
7995	2.44
8000	2.44
8005	2.36
8010	2.41
8015	2.44
8020	2.41
8025	2.5
8030	2.48
8035	2.55
8040	2.45
8045	2.42
8050	2.45
8055	2.4
8060	2.56
8065	2.52
8070	2.43
8075	2.45
8080	2.54
8085	2.47
8090	2.44
8095	2.48
8100	2.43
8105	2.51
8110	2.61
8115	2.61
8120	2.57
8125	2.53
8130	2.47
8135	2.54
8140	2.49
8145	2.59

8150	2.57
8155	2.56
8160	2.55
8165	2.61
8170	2.51
8175	2.52
8180	2.57
8185	2.67
8190	2.6
8195	2.67
8200	2.54
8205	2.5
8210	2.64
8215	2.61
8220	2.65
8225	2.6
8230	2.52
8235	2.64
8240	2.58
8245	2.57
8250	2.52
8255	2.62
8260	2.54
8265	2.64
8270	2.56
8275	2.65
8280	2.73
8285	2.66
8290	2.75
8295	2.82
8300	2.91
8305	2.75
8310	2.73
8315	2.71
8320	2.6
8325	2.75
8330	2.61
8335	2.76
8340	2.77
8345	2.81
8350	2.66

8355	2.69
8360	2.69
8365	2.67
8370	2.74
8375	2.72
8380	2.74
8385	2.76
8390	2.74
8395	2.74
8400	2.78
8405	2.74
8410	2.68
8415	2.74
8420	2.77
8425	2.75
8430	2.74
8435	2.83
8440	2.82
8445	2.82
8450	2.78
8455	3.06
8460	2.89
8465	2.88
8470	2.88
8475	2.86
8480	2.81
8485	2.85
8490	2.88
8495	2.93
8500	3.02
8505	2.9
8510	2.92
8515	2.77
8520	2.85
8525	2.9
8530	2.69
8535	2.81
8540	2.89
8545	2.96
8550	2.91
8555	2.72

8560	2.82
8565	2.84
8570	2.84
8575	2.75
8580	2.85
8585	2.71
8590	2.79
8595	2.74
8600	2.78
8605	2.83
8610	2.95
8615	2.92
8620	2.87
8625	2.94
8630	2.83
8635	2.93
8640	2.85
8645	2.81
8650	2.82
8655	2.86
8660	2.81
8665	2.88
8670	3.02
8675	3.01
8680	2.83
8685	3.01
8690	2.93
8695	2.92
8700	3.05
8705	3.05
8710	2.87
8715	2.89
8720	2.86
8725	2.92
8730	3.08
8735	2.92
8740	2.91
8745	2.93
8750	3.09
8755	3.01
8760	3.08

8765	3.08
8770	3
8775	3.12
8780	3
8785	2.98
8790	3.12
8795	2.98
8800	3.06
8805	3.02
8810	3.03
8815	3.24
8820	3.09
8825	3.17
8830	3.24
8835	3.08
8840	3.19
8845	3.1
8850	3.32
8855	3.22
8860	3.31
8865	3.26
8870	3.25
8875	3.25
8880	3.41
8885	3.22
8890	3.42
8895	3.6
8900	3.28
8905	3.91
8910	3.45
8915	3.39
8920	3.49
8925	3.83
8930	3.48
8935	3.41
8940	3.3
8945	3.32
8950	3.48
8955	3.26
8960	3.36
8965	3.32

8970	3.42
8975	3.27
8980	3.3
8985	3.48
8990	3.36
8995	3.36
9000	3.28
9005	3.37
9010	3.45
9015	3.41
9020	3.62
9025	3.52
9030	3.57
9035	3.37
9040	3.54
9045	3.41
9050	3.5
9055	3.49
9060	3.61
9065	3.43
9070	3.42
9075	3.5
9080	3.32
9085	3.85
9090	3.48
9095	3.46
9100	3.32
9105	3.2
9110	3.21
9115	3.17
9120	3.35
9125	3.26
9130	3.41
9135	3.2
9140	3.25
9145	3.33
9150	3.38
9155	3.13
9160	3.32
9165	3.35
9170	3.25

9175	3.17
9180	3.17
9185	3.4
9190	3.34
9195	3.23
9200	3.36
9205	3.26
9210	3.48
9215	3.34
9220	3.33
9225	3.29
9230	3.3
9235	3.41
9240	3.39
9245	3.38
9250	3.24
9255	3.43
9260	3.22
9265	3.23
9270	3.44
9275	3.2
9280	3.39
9285	3.3
9290	3.29
9295	3.39
9300	3.28
9305	3.05
9310	3.11
9315	3.16
9320	3.23
9325	3.26
9330	3.22
9335	3.06
9340	3.18
9345	3.19
9350	3.16
9355	3.29
9360	3.37
9365	3.24
9370	3.19
9375	3.35

9380	3.21
9385	3.32
9390	3.28
9395	3.3
9400	3.37
9405	3.16
9410	3.28
9415	3.2
9420	3.3
9425	3.26
9430	3.22
9435	3.36
9440	3.22
9445	3.38
9450	3.3
9455	3.25
9460	3.2
9465	3.3
9470	3.33
9475	3.26
9480	3.3
9485	3.26
9490	3.2
9495	3.35
9500	3.29
9505	3.42
9510	3.42
9515	3.35
9520	3.4
9525	3.4
9530	3.26
9535	3.38
9540	3.19
9545	3.41
9550	3.41
9555	3.21
9560	3.35
9565	3.25
9570	3.43
9575	3.26
9580	3.42

9585	3.35
9590	3.48
9595	3.26
9600	3.47
9605	3.47
9610	3.31
9615	3.26
9620	3.34
9625	3.44
9630	3.36
9635	3.41
9640	3.37
9645	3.25
9650	3.58
9655	3.5
9660	3.3
9665	3.48
9670	3.32
9675	3.4
9680	3.55
9685	3.37
9690	3.44
9695	3.5
9700	3.4
9705	3.5
9710	3.3
9715	3.33
9720	3.41
9725	3.31
9730	3.32
9735	3.56
9740	3.42
9745	3.53
9750	3.44
9755	3.47
9760	3.54
9765	3.68
9770	3.59
9775	3.72
9780	3.56
9785	3.48

9790	3.61
9795	3.46
9800	3.67
9805	3.48
9810	3.57
9815	3.63
9820	3.48
9825	3.34
9830	3.44
9835	3.3
9840	3.6
9845	3.66
9850	3.67
9855	3.64
9860	3.4
9865	3.48
9870	3.36
9875	3.23
9880	3.32
9885	3.11
9890	3.16
9895	3.24
9900	3.33
9905	3.39
9910	3.49
9915	3.56
9920	3.62
9925	3.58
9930	3.5
9935	3.41
9940	3.54
9945	3.56
9950	3.5
9955	3.36
9960	3.41
9965	3.27
9970	3.5
9975	3.66
9980	3.6
9985	3.61
9990	3.53

9995	3.58
10000	3.76
10005	3.74
10010	3.68
10015	3.38
10020	3.21
10025	3.32
10030	3.13
10035	3.07
10040	3.1
10045	3.07
10050	3.3
10055	3.28
10060	3.12
10065	3.23
10070	3.25
10075	3.17
10080	3.03
10085	3.15
10090	3.34
10095	3.57
10100	3.61
10105	3.51
10110	3.48
10115	3.48
10120	3.36
10125	3.26
10130	3.28
10135	3.22
10140	2.97
10145	3.09
10150	3
10155	3.08
10160	2.96
10165	3.14
10170	3.13
10175	3.04
10180	3.14
10185	2.97
10190	3.04
10195	2.99

10200	3.2
10205	3.13
10210	3.1
10215	2.99
10220	3.04
10225	3.37
10230	3.55
10235	3.76
10240	3.86
10245	3.89
10250	3.67
10255	3.75
10260	3.65
10265	3.7
10270	3.81
10275	3.81
10280	3.8
10285	3.7
10290	3.77
10295	3.68
10300	3.81
10305	3.71
10310	3.77
10315	3.91
10320	3.7
10325	3.7
10330	3.71
10335	3.73
10340	3.73
10345	3.91
10350	3.81
10355	3.68
10360	3.77
10365	3.75
10370	3.79
10375	3.71
10380	3.8
10385	3.51
10390	3.42
10395	3.37
10400	3.26

10405	3.11
10410	3.08
10415	3.24
10420	3.03
10425	3.05
10430	3.02
10435	2.97
10440	3.02
10445	3.04
10450	2.96
10455	3.13
10460	2.95
10465	3.06
10470	3.01
10475	3.11
10480	3.1
10485	3.08
10490	3.03
10495	3.01
10500	2.88
10505	3.01
10510	2.86
10515	2.95
10520	2.89
10525	2.87
10530	2.88
10535	2.86
10540	3.01
10545	2.96
10550	2.96
10555	2.83
10560	2.94
10565	2.91
10570	2.89
10575	3
10580	3.05
10585	2.97
10590	3.04
10595	3.09
10600	2.93
10605	3.04

10610	3.08
10615	2.98
10620	2.93
10625	3
10630	3.04
10635	3
10640	2.94
10645	3.12
10650	3.13
10655	2.94
10660	2.92
10665	2.91
10670	3.08
10675	2.89
10680	3.04
10685	3.01
10690	3.05
10695	3.03
10700	2.87
10705	2.95
10710	2.89
10715	2.86
10720	2.87
10725	2.83
10730	2.81
10735	2.93
10740	2.73
10745	2.82
10750	2.87
10755	2.71
10760	2.84
10765	2.85
10770	2.84
10775	2.82
10780	2.73
10785	2.67
10790	2.66
10795	2.67
10800	2.75
10805	2.8
10810	2.67

10815	2.68
10820	2.63
10825	2.63
10830	2.64
10835	2.8
10840	2.65
10845	2.7
10850	2.72
10855	2.78
10860	2.62
10865	2.62
10870	2.77
10875	2.64
10880	2.78
10885	2.68
10890	2.76
10895	2.71
10900	2.77
10905	2.82
10910	2.74
10915	2.59
10920	2.57
10925	2.55
10930	2.59
10935	2.6
10940	2.66
10945	2.55
10950	2.51
10955	2.46
10960	2.44
10965	2.49
10970	2.41
10975	2.56
10980	2.34
10985	2.43
10990	2.42
10995	2.45
11000	2.32
11005	2.3
11010	2.29
11015	2.29

11020	2.41
11025	2.38
11030	2.3
11035	2.25
11040	2.39
11045	2.31
11050	2.36
11055	2.23
11060	2.28
11065	2.27
11070	2.28
11075	2.3
11080	2.34
11085	2.28
11090	2.21
11095	2.17
11100	2.17
11105	2.25
11110	2.26
11115	2.2
11120	2.28
11125	2.29
11130	2.26
11135	2.24
11140	2.25
11145	2.23
11150	2.31
11155	2.33
11160	2.3
11165	2.24
11170	2.22
11175	2.23
11180	2.36
11185	2.31
11190	2.31
11195	2.39
11200	2.31
11205	2.37
11210	2.38
11215	2.57
11220	2.47

11225	2.47
11230	2.68
11235	2.61
11240	2.69
11245	2.57
11250	2.53
11255	2.56
11260	2.53
11265	2.42
11270	2.39
11275	2.53
11280	2.5
11285	2.48
11290	2.33
11295	2.48
11300	2.43
11305	2.48
11310	2.48
11315	2.47
11320	2.36
11325	2.39
11330	2.35
11335	2.31
11340	2.42
11345	2.45
11350	2.43
11355	2.45
11360	2.51
11365	2.47
11370	2.4
11375	2.42
11380	2.4
11385	2.4
11390	2.4
11395	2.31
11400	2.36
11405	2.25
11410	2.34
11415	2.29
11420	2.2
11425	2.26

11430	2.23
11435	2.35
11440	2.27
11445	2.15
11450	2.14
11455	2.17
11460	2.21
11465	2.13
11470	2.16
11475	2.19
11480	2.1
11485	2.19
11490	2.24
11495	2.21
11500	2.09
11505	2.21
11510	2.18
11515	2.12
11520	2.14
11525	2.21
11530	2.19
11535	2.18
11540	2.06
11545	2.17
11550	2.14
11555	2.18
11560	2.17
11565	2.2
11570	2.12
11575	2.17
11580	2.15
11585	2.19
11590	2.33
11595	2.27
11600	2.28
11605	2.31
11610	2.35
11615	2.31
11620	2.18
11625	2.24
11630	2.16

11635	2.07
11640	2.26
11645	2.34
11650	2.24
11655	2.34
11660	2.34
11665	2.4
11670	2.44
11675	2.45
11680	2.29
11685	2.37
11690	2.34
11695	2.44
11700	2.4
11705	2.42
11710	2.43
11715	2.32
11720	2.32
11725	2.26
11730	2.32
11735	2.37
11740	2.37
11745	2.37
11750	2.24
11755	2.2
11760	2.19
11765	2.26
11770	2.19
11775	2.23
11780	2.29
11785	2.18
11790	2.24
11795	2.19
11800	2.17
11805	2.2
11810	2.18
11815	2.16
11820	2.18
11825	2.17
11830	2.12
11835	2.2

11840	2.14
11845	2.17
11850	2.13
11855	2.08
11860	2.1
11865	2.13
11870	2.03
11875	2.05
11880	2.16
11885	2.17
11890	2.06
11895	2.06
11900	2.15
11905	2.08
11910	2.1
11915	2.16
11920	2.15
11925	2.09
11930	2.04
11935	2.05
11940	2
11945	2.03
11950	2.01
11955	2.03
11960	2.13
11965	2.1
11970	2.05
11975	2.08
11980	2.04
11985	2.07
11990	2.08
11995	2.08
12000	2.08
12005	2.04
12010	2.06
12015	1.98
12020	2.14
12025	1.99
12030	2.01
12035	2.04
12040	2.04

12045	1.96
12050	2.05
12055	2.01
12060	2.01
12065	1.96
12070	2.12
12075	2.05
12080	2.09
12085	2.08
12090	2.07
12095	2.03
12100	2.1
12105	2.01
12110	2.14
12115	1.98
12120	2.07
12125	2.03
12130	1.99
12135	2
12140	2.02
12145	1.96
12150	2.09
12155	2.05
12160	2.1
12165	2.17
12170	2.01
12175	2.13
12180	2.02
12185	2.14
12190	2.03
12195	2.17
12200	2.15
12205	2.05
12210	2.08
12215	2.16
12220	2.12
12225	2.08
12230	2.16
12235	2.08
12240	2.17
12245	2.18

12250	2.22
12255	2.12
12260	2.2
12265	2.2
12270	2.22
12275	2.25
12280	2.14
12285	2.26
12290	2.25
12295	2.29
12300	2.22
12305	2.3
12310	2.33
12315	2.25
12320	2.26
12325	2.31
12330	2.2
12335	2.2
12340	2.2
12345	2.3
12350	2.3
12355	2.3
12360	2.3
12365	2.2
12370	2.2
12375	2.3
12380	2.3
12385	2.3
12390	2.3
12395	2.3
12400	2.3
12405	2.4
12410	2.3
12415	2.3
12420	2.3
12425	2.3
12430	2.3
12435	2.5
12440	2.5
12445	2.5
12450	2.4

12455	2.4
12460	2.6
12465	2.6
12470	2.6
12475	2.6
12480	2.5
12485	2.5
12490	2.7
12495	2.7
12500	2.7
12505	2.8
12510	2.6
12515	2.8
12520	2.8
12525	3
12530	2.9
12535	3.1
12540	2.9
12545	2.9
12550	2.7
12555	2.8
12560	2.9
12565	2.6
12570	2.7
12575	2.5
12580	2.7
12585	2.7
12590	2.7
12595	2.7
12600	2.7
12605	2.7
12610	2.6
12615	2.8
12620	2.7
12625	2.7
12630	2.6
12635	2.6
12640	2.7
12645	2.6
12650	2.7
12655	2.7

12660	2.6
12665	2.7
12670	2.7
12675	2.7
12680	2.8
12685	2.7
12690	2.9
12695	2.8
12700	2.9
12705	3
12710	3.1
12715	2.9
12720	3
12725	3
12730	3
12735	2.9
12740	2.9
12745	2.8
12750	2.8
12755	2.6
12760	2.8
12765	2.7
12770	2.7
12775	2.8
12780	2.8
12785	2.6
12790	2.6
12795	2.5
12800	2.6
12805	2.5
12810	2.5
12815	2.6
12820	2.6
12825	2.4
12830	2.5
12835	2.6
12840	2.6
12845	2.5
12850	2.4
12855	2.4
12860	2.5

12865	2.4
12870	2.4
12875	2.5
12880	2.4
12885	2.3
12890	2.4
12895	2.3
12900	2.3
12905	2.3
12910	2.4
12915	2.4
12920	2.4
12925	2.4
12930	2.3
12935	2.2
12940	2.4
12945	2.3
12950	2.3
12955	2.3
12960	2.3
12965	2.3
12970	2.2
12975	2.3
12980	2.4
12985	2.2
12990	2.4
12995	2.2
13000	2.3
13005	2.3
13010	2.3
13015	2.3
13020	2.2
13025	2.3
13030	2.2
13035	2.3
13040	2.3
13045	2.3
13050	2.3
13055	2.3
13060	2.3
13065	2.3

13070	2.2
13075	2.2
13080	2.3
13085	2.2
13090	2.3
13095	2.2
13100	2.3
13105	2.2
13110	2.2
13115	2.2
13120	2.2
13125	2.2
13130	2.3
13135	2.2
13140	2.2
13145	2.3
13150	2.2
13155	2.2
13160	2.3
13165	2.2
13170	2.3
13175	2.2
13180	2.3
13185	2.3
13190	2.3
13195	2.3
13200	2.3
13205	2.3
13210	2.2
13215	2.3
13220	2.3
13225	2.2
13230	2.3
13235	2.2
13240	2.3
13245	2.2
13250	2.2
13255	2.2
13260	2.3
13265	2.2
13270	2.1

13275	2.2
13280	2.1
13285	2.2
13290	2.3
13295	2.2
13300	2.3
13305	2.1
13310	2.2
13315	2.2
13320	2.1
13325	2.2
13330	2.1
13335	2.2
13340	2.2
13345	2.2
13350	2.2
13355	2.1
13360	2.1
13365	2.1
13370	2.2
13375	2.1
13380	2.1
13385	2.1
13390	2.1
13395	2.2
13400	2.1
13405	2.2
13410	2.1
13415	2.2
13420	2.1
13425	2.2
13430	2.2
13435	2.1
13440	2.2
13445	2.1
13450	2.1
13455	2.2
13460	2.2
13465	2.1
13470	2
13475	2.1

13480	2
13485	2
13490	2.1
13495	2
13500	2.1
13505	2.1
13510	2.1
13515	2.1
13520	2.1
13525	2
13530	2.1
13535	2
13540	2.1
13545	2
13550	2
13555	2
13560	2.1
13565	2
13570	2
13575	1.9
13580	2
13585	2
13590	2
13595	2
13600	2
13605	2
13610	1.9
13615	1.9
13620	2
13625	2
13630	1.9
13635	2
13640	2
13645	2
13650	1.9
13655	1.9
13660	2
13665	1.9
13670	1.9
13675	2
13680	2

13685	1.9
13690	2
13695	1.9
13700	1.9
13705	1.8
13710	2
13715	1.9
13720	1.9
13725	1.9
13730	1.9
13735	2
13740	1.8
13745	1.9
13750	1.9
13755	1.9
13760	1.9
13765	2
13770	1.9
13775	2
13780	1.9
13785	2
13790	1.9
13795	1.8
13800	2.1
13805	2
13810	1.9
13815	2
13820	1.9
13825	2
13830	1.9
13835	1.9
13840	1.9
13845	2
13850	2
13855	2
13860	1.9
13865	1.9
13870	2
13875	1.9
13880	2
13885	1.9

13890	2
13895	1.9
13900	2
13905	2
13910	1.9
13915	2.1
13920	2
13925	1.9
13930	2
13935	2
13940	1.9
13945	2
13950	2
13955	1.9
13960	1.9
13965	2
13970	2
13975	1.9
13980	1.9
13985	1.9
13990	1.9
13995	1.9
14000	2
14005	1.9
14010	2
14015	1.9
14020	2
14025	1.9
14030	2
14035	1.9
14040	2
14045	2
14050	2
14055	1.9
14060	1.9
14065	2
14070	2
14075	1.9
14080	1.9
14085	1.9
14090	2

14095	1.9
14100	2
14105	2
14110	2
14115	2
14120	1.9
14125	2
14130	2
14135	1.9
14140	2
14145	1.9
14150	1.9
14155	2
14160	1.9
14165	2.1
14170	1.9
14175	2
14180	2
14185	1.9
14190	1.9
14195	2
14200	1.9
14205	1.9
14210	2
14215	2
14220	2
14225	1.8
14230	2
14235	1.9
14240	2
14245	2
14250	1.9
14255	2
14260	2
14265	2
14270	1.9
14275	1.9
14280	2
14285	1.9
14290	2
14295	1.9

14300	2.1
14305	2
14310	2
14315	1.9
14320	2
14325	1.9
14330	2
14335	1.9
14340	1.9
14345	2.1
14350	2
14355	1.9
14360	2
14365	2
14370	2
14375	1.9
14380	1.9
14385	2
14390	1.9
14395	1.9
14400	2
14405	1.9
14410	2
14415	2
14420	2.1
14425	2
14430	2
14435	2.1
14440	2
14445	2
14450	1.9
14455	2
14460	2.1
14465	2
14470	1.9
14475	2.1
14480	2
14485	2.1
14490	2.1
14495	2.1
14500	1.9

14505	2.1
14510	2
14515	2
14520	2.1
14525	2.1
14530	1.9
14535	2.1
14540	2
14545	2
14550	2
14555	2
14560	1.9
14565	2
14570	1.9
14575	1.9
14580	2
14585	2
14590	2
14595	2.1
14600	2
14605	1.9
14610	2
14615	1.9
14620	2.1
14625	2.1
14630	2.1
14635	2
14640	2.1
14645	1.9
14650	2.1
14655	2
14660	2
14665	2.1
14670	2
14675	2
14680	2
14685	2.1
14690	2.1
14695	2.1
14700	2.1
14705	2

14710	2.1
14715	2.1
14720	2.1
14725	2
14730	2.1
14735	2.1
14740	2
14745	2
14750	2.1
14755	2
14760	2.1
14765	2.1
14770	2.1
14775	2.1
14780	2
14785	2.1
14790	2
14795	2
14800	2.2
14805	2
14810	2.1
14815	2
14820	2.1
14825	2.1
14830	2
14835	2
14840	2.1
14845	2
14850	2.1
14855	2.1
14860	2
14865	2
14870	2.1
14875	2
14880	2.1
14885	2.1
14890	2.1
14895	2.1
14900	2
14905	2.1
14910	2.1

14915	2
14920	2
14925	2
14930	2.1
14935	2
14940	2
14945	2.1
14950	2
14955	2
14960	2.1
14965	2
14970	2
14975	2.1
14980	2
14985	2
14990	2.1
14995	2.1
15000	2
15005	2
15010	2
15015	2
15020	2
15025	2
15030	2.1
15035	2
15040	2
15045	2
15050	2
15055	2
15060	2.1
15065	2
15070	2
15075	2
15080	2.1
15085	2
15090	2
15095	2
15100	2
15105	1.9
15110	2
15115	2

15120	2.1
15125	2
15130	2
15135	2.1
15140	1.9
15145	2
15150	2
15155	2
15160	1.9
15165	2
15170	1.9
15175	1.9
15180	2
15185	2
15190	2
15195	1.9
15200	1.9
15205	2
15210	1.9
15215	2
15220	1.8
15225	1.9
15230	1.8
15235	1.9
15240	2
15245	2
15250	1.8
15255	1.9
15260	1.9
15265	1.9
15270	1.9
15275	1.8
15280	1.8
15285	2
15290	1.8
15295	1.9
15300	1.8
15305	1.8
15310	1.8
15315	2

**Lampiran 4. Data respon waktu terhadap kenaikan intensitas cahaya**

t ( $\mu$ s)	Tegangan (Volt)
0	0.75
10	0.75
20	0.75
30	0.75
40	0.75
50	0.75
60	0.75
70	0.75
80	0.75
90	0.75
100	0.75
110	0.75
120	0.75
130	0.75
140	0.75
150	0.75
160	0.74
170	0.75
180	0.75
190	0.75
200	0.75
210	0.75
220	0.75
230	0.75
240	0.75
250	0.75
260	0.75
270	0.75

280	0.75
290	0.75
300	0.75
310	0.75
320	0.75
330	0.75
340	0.75
350	0.75
360	0.75
370	0.75
380	2.36
390	2.39
400	2.4
410	2.4
420	2.4
430	2.4
440	2.4
450	2.4
460	2.4
470	2.4
480	2.4
490	2.4
500	2.4
510	2.4
520	2.4
530	2.4
540	2.39
550	2.4
560	2.4

570	2.4
580	2.4
590	2.4
600	2.4
610	2.4
620	2.4
630	2.4
640	2.4
650	2.4
660	2.4
670	2.4
680	2.4
690	2.4
700	2.4
710	2.4
720	2.4
730	2.4
740	2.4
750	2.4
760	2.4
770	2.4
780	2.4
780	2.4
780	2.4
780	2.4
780	2.4
780	2.4
780	2.4

## Lampiran 5. Program Arduino untuk mengaktifkan *relay* rangkaian lampu LED

```
#include <SPI.h>
```

```
#include <SD.h>
```

```
/*
```

```
SD card read/write
```

This example shows how to read and write data to and from an SD card file

The circuit:

\* SD card attached to SPI bus as follows:

\*\* CS - pin 4

\*\* CLK - pin 13

\*\* MOSI - pin 11

\*\* MISO - pin 12

\*/

File myFile;

```
const int sensorPin = A0;
```

```
const int relay = 3;
```

```
const int setPoint = 100;

float sensor, low=0, high=1023;

float input;

float time = 0;

void setup() {

    pinMode(relay, OUTPUT);

    Serial.begin(9600);

    while (!Serial) {}

    Serial.print("Initializing SD card...");

    pinMode(10, OUTPUT);

    if (!SD.begin(4)) {

        Serial.println("initialization failed!");

        return;

    }

    Serial.println("initialization done.");

}

void loop() {

    sensor = analogRead(sensorPin);
```

```

input = sensor * (5.0 / 1023.0);

autoTune();

if (setPoint-sensor >= 0){

    digitalWrite(relay, HIGH);

}

else if (setPoint-sensor < 0){

    digitalWrite(relay, LOW);

}

String data = String(time) + " " +String(input,2)+" " +String(sensor);

Serial.println(" ");

File myFile=SD.open("DATA.xls",FILE_WRITE);

if (myFile){

    myFile.println(data);

    myFile.close();

    Serial.print(data);

}

time = time + 5;

myFile.close();

```

```
    delay(5000);

}

void autoTune(){

    if (sensor < low){

        low = sensor;

    }

    if (sensor > high){

        high = sensor;

    }

    sensor = map(sensor, low, high, 0, 255);

    sensor = constrain(sensor, 0, 255);

}
```

**Lampiran 6. Tanaman selada setelah proses pembibitan dan siap dimasukkan ke dalam *greenhouse***



**Lampiran 7. Hasil tanaman selada tanpa alat kontrol intensitas cahaya**



**Lampiran 8. Hasil tanaman selada yang dikontrol intensitas cahayanya**

