



TUGAS AKHIR - TF 181801

ANALISA PENGGUNAAN SUMBER CAHAYA PUTIH LED DIKROMATIK PADA SISTEM KOMUNIKASI CAHAYA TAMPAK OOK-NRZ

A A NGURAH ARYMURTI SANTOSA
NRP. 02311540000110

Dosen Pembimbing :
Agus Muhammad Hatta, ST, Msi, Ph.D
Dr. Sasono Rahardjo, B.Eng. M.Eng

DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019



TUGAS AKHIR - TF 181801

**ANALISA PENGGUNAAN SUMBER CAHAYA
PUTIH LED DIKROMATIK PADA SISTEM
KOMUNIKASI CAHAYA TAMPAK OOK-NRZ**

**A A NGURAH ARYMURTI SANTOSA
NRP. 02311540000110**

**Dosen Pembimbing :
Agus Muhammad Hatta, ST, Msi, Ph.D
Dr. Sasono Rahardjo, B.Eng. M.Eng**

**DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019**

Halaman ini sengaja dikosongkan



FINAL PROJECT - TF 181801

**ANALYZING THE USAGE OF DICHROMATIC
WHITE LED LIGHT SOURCE IN OOK-NRZ
VISIBLE LIGHT COMMUNICATION SYSTEM**

A A NGURAH ARYMURTI SANTOSA
NRP. 02311540000110

Supervisors :
Agus Muhammad Hatta, ST, Msi, Ph.D
Dr. Sasono Rahardjo, B.Eng. M.Eng

ENGINEERING PHYSICS DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2019

This page is left blank intentionally

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : A A Ngr Arymurti Santosa

NRP : 02311540000110

Departemen: : Teknik Fisika FTI-ITS

Dengan ini menyatakan bahwa tugas akhir dengan judul “**Analisa Penggunaan Sumber Cahaya Putih LED Dikromatik Pada Sistem Komunikasi Cahaya Tampak OOK-NRZ**” bebas dari plagiasi. Apabila pernyataan ini terbukti tidak benar, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini.

Surabaya, 13 Juli 2019

Pernyataan oleh,



A A Ngr Arymurti Santosa

Halaman ini sengaja dikosongkan

**ANALISA PENGGUNAAN SUMBER CAHAYA PUTIH
LED DIKROMATIK PADA SISTEM KOMUNIKASI
CAHAYA TAMPAK OOK-NRZ**

TUGAS AKHIR

Oleh:

ANAK AGUNG NGURAH ARYMURTI SANTOSA

NRP. 02311540000110

Surabaya, 30 Juli 2019
Mengetahui/Menyetujui

Pembimbing I

Pembimbing II



Agus Muhammad Hatta, ST, Msi, Phd
NIP. 19780902 200312 1 002



Dr. Sasono Rahardjo, M.Eng B.Eng.
NIP. 19690201 198812 1 001



Halaman ini sengaja dikosongkan

**ANALISA PENGGUNAAN SUMBER CAHAYA PUTIH
LED DIKROMATIK PADA SISTEM KOMUNIKASI
CAHAYA TAMPAK OOK-NRZ**

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada

Program Studi S-1 Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

ANAK AGUNG NGURAH ARYMURTI SANTOSA
NRP. 02311540000110

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir

1. Agus Muhammad Hatta ST, Msi, Ph (Pembimbing I)
2. Dr. Sasono Rahardjo, B.Eng. M.Eng (Pembimbing II)
3. Prof. Dr. Ir. Sekartedjo, M.sc (Ketua penguji)
4. Dr.rer.nat Ir. Aulia M.T. Nasution, M.Sc (Penguji 1)

SURABAYA
JULI 2019

Halaman ini sengaja dikosongkan

**ANALISA PENGGUNAAN SUMBER CAHAYA PUTIH
LED DIKROMATIK PADA SISTEM KOMUNIKASI
CAHAYA TAMPAK OOK-NRZ**

Nama : A A Ngr Arymurti Santosa
NRP : 02311540000110
Prodi : S1 Teknik Fisika
Pembimbing : Agus Muhammad Hatta, ST, Msi, Phd
Dr. Sasono Rahardjo, M.Eng, B.Eng

ABSTRAK

Sistem komunikasi cahaya tampak merupakan salah satu solusi dengan potensi terbaik untuk menghadapi era komunikasi 5G dan keperluan *bandwidth* yang terus meningkat setiap tahun. Sistem komunikasi cahaya tampak pada umumnya memanfaatkan lampu LED putih dengan lapisan fosfor, tetapi LED ini memiliki efek keterlambatan dari lapisan fosfor yang membatasi *bandwidth* komunikasi sistem. Solusi yang digunakan untuk LED putih fosfor saat ini adalah dengan menggunakan 3 komponen LED (Trikromatik RGB) atau filter optik biru yang cukup mahal. Pada tugas akhir ini 2 komponen LED (dikromatik) digunakan sebagai alternatif dalam mengatasi permasalahan tipe LED sebelumnya. Telah didapatkan nilai CRI, CCT, dan *chromaticity* untuk LED Dikromatis Lime-Red yaitu CRI 81,8, CCT 2747K, dan nilai *chromaticity* (0,4928;0,4771) untuk CIE 1931 (x;y) dan (0,2547;0,5548) untuk CIE 1976 (u' ; v'). Kemudian kombinasi LED dikromatik Lime-Blue dengan CRI 76,4, CCT 72322K, dan nilai *chromaticity* (0,1903;0,3967) untuk CIE 1931 (x;y) dan (0,1903;0,3967) untuk CIE 1976 (u' ; v'). Serta telah didapatkan laju data untuk setiap LED dan kombinasi LED dengan BER $1 \cdot 10^{-9}$ pada red modulated RGB (0,62 Mbps), lime modulated red

(0,94 Mbps), lime modulated blue (0,96 Mbps), lime (0,98 Mbps), blue modulated RGB (1,02 Mbps), cool white phosphor (1,09 Mbps), green modulated RGB (1,11 Mbps), green (1,15 Mbps), blue modulated lime (1,28 Mbps), red modulated lime (1,31 Mbps), blue (1,34 Mbps), dan red (1,39 Mbps). LED dikromatik Lime-Red dan Lime-Blue memiliki laju data mendekati operasi LED Merah/Biru tunggal sehingga dapat digunakan sebagai alternatif LED putih fosfor. LED dikromatis Lime-Red dan Lime-Blue juga lebih ekonomis dibandingkan dengan LED Trikromatik RGB standar berdasarkan jumlah LED yang digunakan.

Kata Kunci: VLC, LED Dikromatik, OOK-NRZ

***ANALYZING THE USAGE OF DICHROMATIC WHITE
LED LIGHT SOURCE IN OOK-NRZ VISIBLE LIGHT
COMMUNICATION SYSTEM***

Name : A A Ngr Arymurti Santosa
ID : 02311540000110
Study Program : Bachelor of Engineering Physics
Supervisor : Agus Muhammad Hatta, ST, Msi, Phd
Dr. Sasono Rahardjo, M.Eng, B.Eng

ABSTRACT

Visible light communication is regarded as one of the most highest potential solution to solving the problems that arise from 5G communication and the bandwidth bottleneck that keeps rising each year. Quality of a communication system can be quantified by the data rate, and BER (Bit Error Rate). Other than communication system, visible light communication also plays a role in lighting infrastructure and so a good LED lamp with a good lighting characteristics such as its CRI is used. White LED lamp with phosphor layer is the most common choice in visible light communication system, but this type of LED has a slowing effect caused by its phosphor layer which reduces its communication bandwidth and so 3 LED components that is Trichromatic RGB is used as an alternative. In this final project 2 LED components (dichromatic) is used as an another solution to solve previous LED type problems. CRI, CCT, and chromaticity for Dichromatic LED Lime-Red are obtained as follows, CRI 81,8; CCT 2747K, and chromaticity (0,4928;0,4771) for CIR 1931 (x,y) and (0,2547;0,5548) for CIE 1976 (u'; v'). And then for Lime-Blue Dichromatic LED Combination is obtained as follows, CRI 76,4, CCT 72322K, and chromaticity (0,1903;0,3967) for CIE 1931

$(x;y)$ and $(0,1903;0,3967)$ for CIE 1976 $(u';v')$. Maximum data rates for every LED and LED combination with the lowest BER ($1 \cdot 10^{-9}$) is also obtained for red modulated RGB (0,62 Mbps), lime modulated red (0,94 Mbps), lime modulated blue (0,96 Mbps), lime (0,98 Mbps), blue modulated RGB (1,02 Mbps), cool white phosphor (1,09 Mbps), green modulated RGB (1,11 Mbps), green (1,15 Mbps), blue modulated lime (1,28 Mbps), red modulated lime (1,31 Mbps), blue (1,34 Mbps), and red (1,39 Mbps). Lime-Red and Lime-Blue Dichromatic LED has a data rate comparable to a single Red/Blue LED, which then can be used as an alternative to a single Phosphorous White LED. Lime-Red and Lime-Blue Dichromatic LED also has an economic advantage compared to standard RGB Trichromatic LED based on the number of LED used.

Key Work: VLC, LED Dikromatik, OOK-NRZ

KATA PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberikan rahmat serta karunia-Nya sehingga laporan tugas akhir ini dapat diselesaikan dengan baik. Laporan tugas akhir dengan judul “Analisa Penggunaan Sumber Cahaya Putih LED Dikromatik Pada Sistem Komunikasi Cahaya Tampak OOK-NRZ” disusun dalam rangka penyelesaian pelaksanaan tugas akhir. Pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan banyak terimakasih kepada:

1. Keluarga penulis yang tercinta yaitu Ayah Ir IGN. Oka Santosa,MM. Ibu Dr.dr.A.A. Ayu Putri Laksmidewi, SpS(K), Kakak dr.A.A. Ngurah Adhiyoga Santosa, S.Ked, dan Adik A.A. Ayu Arini Santosa.
2. Bapak Agus Muhamad Hatta, ST, MSi, Ph.D sebagai pembimbing tugas akhir dan kepala Departemen Teknik Fisika FTI-ITS.
3. Dr. Sasono Rahardjo, B.Eng. M.Eng sebagai kepala laboratorium fotonika PTE-BPPT serta pembimbing tugas akhir pada BPPT yang telah membimbing penulis dalam mengerjakan penelitiannya serta telah memberikan penulis kesempatan untuk melakukan penelitian ini.
4. Bapak Prof. Sekartedjo selaku Kepala Laboratorium Rekayasa Fotonika dan sebagai dosen yang membantu penulis dalam mengembangkan pola pikirnya.
5. Bapak Dr.rer.nat Ir. Muhammad Aulia Nasution M,Sc sebagai dosen bidang minat rekayasa fotonika dan advisor untuk SPIE Student Chapter ITS.
6. Bapak Iwan Cony Setiadi sebagai dosen bidang minat rekayasa fotonika.

7. Bapak Detak Yan Pratama, S.T, M.Sc. sebagai dosen pembimbing akademik penulis pada Departemen Teknik Fisika FTI-ITS.
8. Paman A.A.Ngurah Ananda Kusuma, BE(Hons), M.Eng, PhD yang telah membantu penulis belajar dan beradaptasi di Tangerang.
9. Ibu Dwi Fasti sebagai sekretaris PTE-BPPT yang telah membantu penulis dalam proses administrasi untuk mengambil data di PTE-BPPT.
10. Ibu Alindra, Mas Hafiz, Mas Dena, Mas Tinova, Mas Fajri, dan Mas yang telah membantu penulis pada BPPT sehingga penelitian ini dapat dilaksanakan.
11. Rekan asisten Laboratorium Rekayasa Fotonika yang telah membantu penulis untuk menyelesaikan tugas akhir ini.
12. Semua pihak yang telah memberikan bantuan dari awal tugas akhir hingga selesainya laporan ini, baik secara langsung maupun tidak langsung yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa laporan ini belum sempurna, untuk itu penulis mengharapkan saran dan kritik yang membangun untuk kesempurnaan laporan ini. Penulis mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya atas bantuan yang diberikan demi kelancaran tugas akhir ini.

Surabaya, 13 Juni 2019

Penulis, A A Ngr Arymurti Santosa

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	v
HALAMAN PENGESAHAN	vii
ABSTRAK	xi
<i>ABSTRACT</i>	xiii
KATA PENGANTAR.....	xv
DAFTAR ISI.....	xvii
DAFTAR GAMBAR	xix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan	3
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Sistematika Laporan.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Spektrum Cahaya Tampak	7
2.2 VLC (<i>Visible Light Communication</i>)	8
2.3 Modulasi OOK-NRZ.....	9
2.4 LED (<i>Light Emitting Diode</i>).....	10
2.5 Fotodioda	13
2.6 TIA (<i>Transimpedance Amplifier</i>)	15
2.7 <i>Chromaticity</i>	17
2.8 CRI (<i>Color Rendering Index</i>).....	20
2.9 BER (<i>Bit Error Rate</i>)	20
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	23
3.1 Studi Literatur	23
3.2 Rancang Bangun LED.....	24
3.3 Pengukuran <i>Chromaticity</i> , CRI & CCT.....	27
3.4 Karakterisasi Parameter LED	28
3.5 Merancang Sistem Visible Light Communication.....	30
3.6 Pengukuran Laju Data & BER	35
BAB IV HASIL & PEMBAHASAN	37
4.1 <i>Chromaticity</i> , CRI & CCT Rancang Bangun LED.....	37
4.2 Karakteristik Parameter LED	54

4.3	Pengujian Rangkaian Sistem.....	70
4.4	Analisa Laju Data & BER LED.....	70
BAB V	PENUTUP.....	79
5.1	Kesimpulan.....	79
5.2	Saran.....	79
DAFTAR PUSTAKA	.....	81
LAMPIRAN	.....	87

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Deret Spektrum Gelombang Elektromagnetik	7
Gambar 2.2 Skema Sistem Komunikasi Li-Fi atau VLC.....	9
Gambar 2.3 <i>Waveform</i> OOK-NRZ dan OOK-RZ	10
Gambar 2.4 Proses Rekombinasi Langsung Pada LED	11
Gambar 2.5 Konfigurasi Sumber Cahaya Putih LED	12
Gambar 2.6 Struktur material dalam fotodiode PIN	13
Gambar 2.7 Skematik TIA Sebagai Penerima Arus	16
Gambar 2.8 CIE <i>Color Space</i> 1931	18
Gambar 2.9 CIE <i>Color Space</i> 1976.....	18
Gambar 2.10 CCT Temperatur LED	19
Gambar 2.11 (a) <i>Sinyal yang terdistorsi</i> (b) <i>probabilitas kemunculan bit 0 dan 1</i>	21
Gambar 2.12 <i>Prinsip kerja BER-Tester</i>	22
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	23
Gambar 3.2 LED Rebel Luxeon Color Line	24
Gambar 3.3 Rancangan LED.....	25
Gambar 3.4 LED Hijau	25
Gambar 3.5 LED Biru	26
Gambar 3.6 LED Merah.....	26
Gambar 3.7 LED Lime.....	26
Gambar 3.8 LED Jingga.....	27
Gambar 3.9 LED Jingga Fosfor.....	27
Gambar 3.10 Skematik Pengukuran Karakteristik LED	28
Gambar 3.11 Blok Sistem Komunikasi Cahaya Tampak.....	30
Gambar 3.12 Sistem Transmitter Komunikasi Cahaya Tampak ..	32
Gambar 3.13 Skematik Rangkaian Transmitter	32
Gambar 3.14 Sistem Receiver Komunikasi Cahaya Tampak	33
Gambar 3.15 Skematik Rangkaian Receiver	34
Gambar 4.1 LED Cool White Phosphor	37
Gambar 4.2 CRI LED Cool White	38
Gambar 4.3 CRI LED Cool White vs I(mA)	38
Gambar 4.4 Chromaticity & CCT LED Cool White	39
Gambar 4.5 Panjang Gelombang LED Cool White.....	39
Gambar 4.6 LED Biru & Jingga.....	40

Gambar 4.7 CRI LED Biru & Jingga	41
Gambar 4.8 CRI Biru-Jingga vs I(mA) LED Biru	41
Gambar 4.9 Chromaticity & CCT LED Biru & Jingga.....	42
Gambar 4.10 Panjang Gelombang LED Biru & Jingga	42
Gambar 4.11 LED Biru & Jingga Fosfor	43
Gambar 4.12 CRI LED Biru & Jingga Fosfor	44
Gambar 4.13 CRI Biru-Jingga Fosfor Vs I(mA) LED Biru.....	44
Gambar 4.14 Chromaticity & CCT LED Biru & Jingga Fosfor ...	45
Gambar 4.15 Panjang Gelombang LED Biru & Jingga Fosfor ...	45
Gambar 4.16 LED Lime & Merah.....	46
Gambar 4.17 CRI LED Lime & Merah.....	47
Gambar 4.18 CRI LED Lime-Red Vs I(mA) LED Merah.....	47
Gambar 4.19 Chromaticity & CCT LED Lime & Merah	48
Gambar 4.20 Panjang Gelombang LED Lime & Merah.....	48
Gambar 4.21 LED Lime & Biru	49
Gambar 4.22 CRI LED Lime & Biru	50
Gambar 4.23 CRI LED Lime-Blue Vs I(mA) LED Biru	50
Gambar 4.24 Chromaticity & CCT LED Lime & Biru.....	51
Gambar 4.25 Panjang Gelombang LED Lime & Biru	51
Gambar 4.26 LED RGB	52
Gambar 4.27 CRI LED RGB	53
Gambar 4.28 Chromaticity & CCT LED RGB.....	53
Gambar 4.29 Panjang Gelombang LED RGB	54
Gambar 4.30 Hubungan I(mA) Terhadap Vd(V) Pada LED Cool White	55
Gambar 4.31 Hubungan I(mA) Terhadap Vs(V) Pada LED Cool White	56
Gambar 4.32 Hubungan Illuminance(Lux) Terhadap Vs(V) LED Cool White	56
Gambar 4.33 Grafik Kenaikan V-I (Biru) & Penurunan V-I (Merah) Pada LED Cool White.....	57
Gambar 4.34 Hubungan I(mA) Terhadap Vd(V) Pada LED Lime	58
Gambar 4.35 Hubungan I(mA) Terhadap Vs(V) Pada LED Lime	59
Gambar 4.36 Hubungan Illuminance(Lux) Terhadap Vs(V) Pada LED Lime	59

Gambar 4.37 Grafik Kenaikan V-I (Biru) & Penurunan V-I (Merah) Pada LED Lime	60
Gambar 4.38 Hubungan I(mA) Terhadap Vd(V) Pada LED Biru	61
Gambar 4.39 Hubungan I(mA) Terhadap Vs(V) Pada LED Biru	62
Gambar 4.40 Hubungan Illuminance(Lux) Terhadap Vs(V) LED Biru	62
Gambar 4.41 Grafik Kenaikan Vd-I (Biru) & Penurunan Vd-I (Merah) Pada LED Biru	63
Gambar 4.42 Hubungan I(mA) Terhadap Vd(V) Pada LED Merah	64
Gambar 4.43 Hubungan I(mA) Terhadap Vs(V) Pada LED Merah	65
Gambar 4.44 Hubungan Illuminance(Lux) Terhadap Vs(V) LED Merah	65
Gambar 4.45 Grafik Kenaikan Vd-I (Biru) & Penurunan Vd-I (Merah) Pada LED Merah	66
Gambar 4.46 Hubungan I(mA) Terhadap Vd(V) Pada LED Hijau	67
Gambar 4.47 Hubungan I(mA) Terhadap Vs(V) Pada LED Hijau	68
Gambar 4.48 Hubungan Illuminance(Lux) Terhadap Vs(V) LED Hijau	68
Gambar 4.49 Grafik Kenaikan Vd-I (Biru) & Penurunan Vd-I (Merah) Pada LED Hijau	69
Gambar 4.50 Pengujian Sistem Pada Pengiriman Data 1 Mbps dari BERT	70
Gambar 4.51 Bit Error Rate LED Tunggal	71
Gambar 4.52 Bit Error Rate LED Lime-Blue	73
Gambar 4.53 Bit Error Rate Lime-Red	74
Gambar 4.54 Bit Error Rate RGB	75
Gambar 4.55 Bit Error Rate Seluruh LED	76

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia sebagai negara dengan populasi ke-4 terbanyak di dunia memiliki pengguna alat komunikasi telepon genggam sebanyak 435 juta pada tahun 2018 (Badan Pusat Statistik Indonesia, 2018). Hal ini mengakibatkan keperluan akan *bandwidth* yang kritis di Indonesia tidak dapat ditunda lagi. Penggunaan sistem komunikasi meningkat setiap tahunnya dan tentunya keinginan akan pengguna *bandwidth* juga akan meningkat, dari 3G, 4G hingga menuju 5G. Sistem komunikasi *Wireless Communication* yang sampai saat ini masih banyak digunakan adalah Wi-Fi yang memanfaatkan frekuensi radio pada 2.4 GHz sampai 5.8 Ghz. Sistem Wi-Fi memiliki kekurangan yaitu adanya keterbatasan akan kapabilitas data yang dapat dibawa, frekuensi radio dapat menembus tembok maka yang dapat membahayakan keamanan data, sering terjadinya interferensi seperti halnya dalam pesawat dan bahkan dilaporkan memiliki efek samping kepada kesehatan manusia khususnya pada penyakit *Neurodegenerative* (Suleyman, et al., 2015).

Li-Fi atau *Light Fidelity* merupakan teknologi *Wireless Communication* terbaru berbasis spektrum cahaya tampak atau VLC memiliki potensi dalam menyelesaikan permasalahan terhadap banyaknya keinginan global akan *bandwidth* (Khan, 2017). Li-Fi sebagai sistem komunikasi memiliki beberapa keuntungan berupa sistem keamanan yang lebih baik karena tidak adanya informasi yang dapat melewati tembok dan tidak adanya radiasi elektromagnetik yang dapat membahayakan tubuh (Blinowski, 2017). Sistem Li-Fi juga memiliki efektivitas biaya yang lebih baik secara signifikan dibandingkan dengan sistem Wi-Fi didalam jangka panjangnya (Niaz, Imdad, & Kim, 2017). Teknologi nirkabel Li-Fi merupakan teknologi yang dapat menggantikan Wi-Fi pada era komunikasi 5G, dikarenakan pemanfaatan gelombang elektromagnetik cahaya tampak 430 THz hingga 790 THz (*unlicensed*) yang belum dimanfaatkan serta akses

internet yang lebih tersebar karena dapat digunakan secara bersamaan dengan pencahayaan suatu infrastruktur.

Sistem VLC (*Visible Light Communication*) merupakan sistem komunikasi nirkabel yang menggunakan spektrum cahaya tampak yang dapat mentransmisikan data dalam bentuk cahaya ke suatu alat yang berfungsi untuk komunikasi dengan memanfaatkan lampu LED untuk pencahayaan. Dua fungsi pada sistem VLC Li-Fi menyebabkan sistem memiliki keuntungan efektivitas biaya secara signifikan lebih baik dalam jangka panjang dibandingkan dengan sistem komunikasi Wi-Fi yang memerlukan unit pengolah sinyal dan tambahan lampu sumber cahaya untuk memenuhi 2 fungsi tersebut (Niaz, Imdad, & Kim, 2017). LED putih memiliki peran penting dalam teknologi komunikasi cahaya tampak dikarenakan bahan semikonduktor LED dengan waktu respon yang cepat terhadap sinyal listrik untuk modulasi, kemudian cahaya putih diperlukan untuk pencahayaan suatu ruangan dimana seluruh spektrum cahaya tampak digunakan untuk *me-render* suatu objek sehingga sesuai dengan tampak aslinya.

LED berwarna putih dapat dihasilkan dengan melakukan *color mixing* dimana kombinasi warna-warna utama dan komplementer dicampurkan, warna utama terdiri dari biru, hijau, dan merah sedangkan warna komplementer terdiri dari kuning untuk biru, magenta untuk hijau, dan sian untuk merah. Kombinasi warna putih dapat dihasilkan dengan 3 metode yaitu dikromatik (2 warna), trikromatik (3 warna), dan tetrakromatik (4 warna). Untuk menghasilkan cahaya putih dengan metode dikromatik diperlukan 1 warna utama dan 1 warna komplementer seperti warna biru dan kuning, warna hijau dan magenta, serta warna merah dan sian (Kim, 2005). Karakteristik dari lampu LED putih yang baik juga perlu dianalisa sesuai kebutuhan di ruangan seperti nilai CCT (*Color Correlated Temperature*), dan CRI (*Color Rendering Index*) yang dihasilkan.

Penelitian sebelumnya, telah beberapa kali didapatkan sistem komunikasi cahaya tampak berkecepatan tinggi menggunakan teknik modulasi OOK-NRZ dan lampu LED putih fosfor atau RGB (H. Le Minh et al., 2009) (Honglei Li X. C., 2014). Tetapi komponen LED putih fosfor memiliki komponen cahaya kuning

yang memperlambat respon penerima terhadap cahaya biru yang dimodulasi sehingga diperlukan *filter* optik pada spektrum 450-500 nm untuk memblokir transmisi spektrum kuning (Haas, 2018). Pada sistem komunikasi cahaya tampak berbasis RGB LED walaupun tidak memerlukan *filter* optik biru, sistem ini masih memiliki keperluan biaya yang tinggi untuk membuat 1 lampu pemancar karena perlu menggunakan 3 *chip* LED yang berbeda serta memiliki kompleksitas yang tinggi untuk menghasilkan sumber cahaya warna putih dengan CRI yang tinggi. Berdasarkan penggunaan 2 tipe pemancar sebelumnya, dilakukan penelitian dimana LED putih berbasis *color mixing* dari 2 LED (biru-jingga, biru-jingga fosfor, Lime-Blue, dan Lime-Red) sebagai pemancar sistem komunikasi cahaya tampak untuk mempercepat laju data dan mengurangi biaya sistem secara keseluruhan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah disampaikan, dapat dirumuskan permasalahan sebagai berikut:

- a. Bagaimanakah kombinasi warna LED dikromatik didapatkan untuk menghasilkan cahaya putih yang memiliki CRI sesuai standar SNI 03-6575-2001.
- b. Bagaimanakah parameter komunikasi BER, dan laju data dari LED dikromatik berwarna putih pada sistem komunikasi cahaya tampak?.

1.3 Tujuan

Tujuan penelitian yang ingin dicapai dalam pengerjaan tugas akhir ini antara lain.

- a. Diperolehnya kombinasi LED dikromatik berwarna putih dengan CRI yang sesuai dengan standar SNI 03-6575-2001.
- b. Diperolehnya karakteristik pada sistem komunikasi (BER, dan laju data) dari LED dikromatis berwarna putih.

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini antara lain:

- a. Teknik modulasi yang digunakan adalah modulasi *single carrier modulation OOK (On Off Keying) NRZ (Non Return Zero)*.
- b. Rentang panjang gelombang yang digunakan adalah pada rentang spektrum cahaya tampak dari LED yang digunakan yaitu 420 nm – 780 nm.
- c. Pemancar sistem komunikasi cahaya tampak menggunakan lampu LED seri LUXEON Rebel.
- d. Kompleksitivitas sistem komunikasi yang dibentuk akan dibatasi khusus untuk PHY layer dari OSI model.
- e. Sistem komunikasi cahaya tampak dilakukan pada dalam ruangan (*indoor*) suasana ruang kerja perkantoran.
- f. Parameter komunikasi yang diukur adalah BER, dan laju data dari sistem.
- g. Parameter *Chromaticity*, CRI dan CCT diukur menggunakan Spectrometer Sekonic C-7000.
- h. Data simbol yang dikirimkan berupa pola sinyal modulasi OOK-NRZ menggunakan BER Tester Anritsu MP8931A .

1.5 Sistematika Laporan

Sistematika penulisan laporan tugas akhir adalah sebagai berikut:

BAB I Pendahuluan

Bab I ini terdiri dari latar belakang, perumusan masalah, tujuan, batasan masalah dan sistematika laporan.

BAB II Teori Penunjang

Bab II membahas mengenai teori-teori yang berkaitan dengan penelitian yang akan dilakukan, seperti VLC, LED Putih, dan parameter-parameter pengukuran .

BAB III Metodologi Penelitian

Bab III berisi mengenai rancangan diagram alir dari penelitian yang dilakukan, metode pengambilan data, dan langkah-langkah perancangan sistem VLC.

BAB IV Hasil & Pembahasan

Bab IV membahas dan menganalisa data yang telah didapatkan berupa CRI & CCT dari rancang LED yang dibentuk serta karakteristik elektronik. Selain itu kemampuan transmisi data

tiap rancang bangun LED dibandingkan melalui BER, SNR, dan laju data.

BAB V Penutup

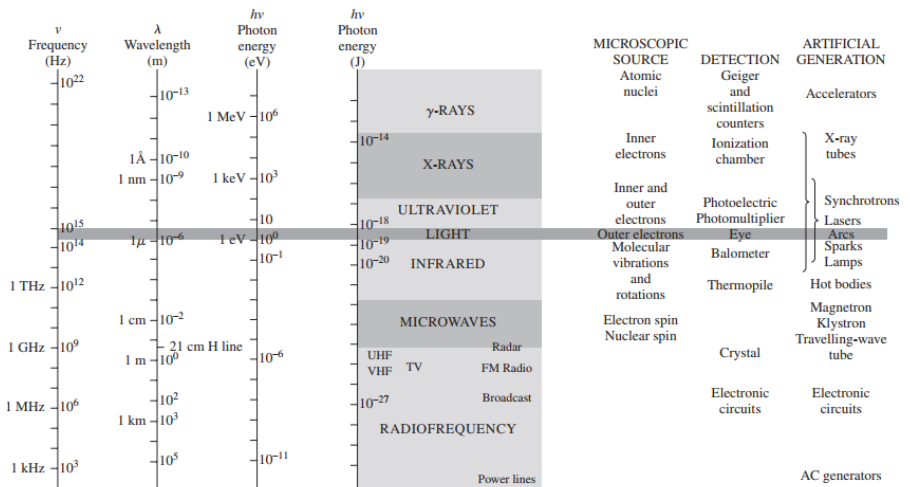
Bab V berisi mengenai kesimpulan yang didapatkan dari hasil tugas akhir. Saran akan diberikan untuk melengkapi kekurangan dari penelitian ini dan untuk mendukung topik penelitian selanjutnya.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Spektrum Cahaya Tampak

Spektrum cahaya tampak atau yang lebih sering disebut sebagai cahaya merupakan gelombang elektromagnetik yang berkisar dari frekuensi 3.84×10^{14} Hz (780 nm) sampai dengan 7.69×10^{14} Hz (390 nm) (Hecht, 2017). Deret spektrum tersebut dikatakan sebagai spektrum cahaya tampak dikarenakan mata manusia yang hanya memiliki respon gelombang elektromagnetik pada kisaran spektrum tersebut. Cahaya umumnya dihasilkan dari proses radiasi termal suatu objek atau akibat dari efek fotoelektrik dimana dengan stimulasi energi listrik terjadi transisi tingkat energi partikel dari tinggi ke rendah.



Gambar 2.1 Deret Spektrum Gelombang Elektromagnetik (Hecht, 2017)

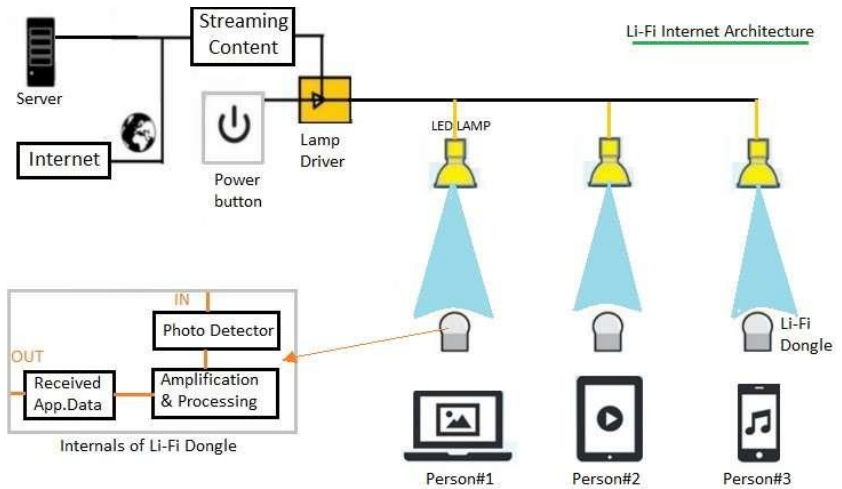
Manusia memiliki 3 tipe reseptor warna yang umumnya menerima warna merah, hijau, dan biru, reseptor warna tersebut diberikan kategori berdasarkan panjang gelombang yang dapat diproses yaitu “L”, “M”, dan “S” untuk *Large*, *Medium*, dan *Short wavelength*. Reseptor warna “L” dapat menerima panjang gelombang 700-400

nm (merah), “M” pada panjang gelombang 670-400 nm (hijau), dan “S” pada panjang gelombang 530-390 nm (biru) (Bradley S. Gundlach, 2018), dengan puncak sensitivitas pada sekitar spektrum 530 nm dan 560 nm (Schnapf, 1987). Maka pada panjang gelombang 750-620 nm reseptor warna “L” terstimulasi dan menghasilkan persepsi warna merah, bila 2 reseptor warna terstimulasi seperti “L” dan “M” akan terbentuk persepsi warna kuning, dan bila ketiga reseptor terstimulasi maka akan didapatkan persepsi warna putih.

2.2 VLC (*Visible Light Communication*)

VLC atau Visible Light Communication merupakan sistem komunikasi nirkabel yang menggunakan spektrum cahaya tampak (380 nm hingga 750 nm sesuai dengan spektrum frekuensi 430 THz hingga 790 THz) pada deret gelombang elektromagnetik untuk mentransmisikan datanya dalam bentuk cahaya ke suatu alat yang digunakan atau alat dalam suatu ruangan. Sistem ini biasanya terdiri dari beberapa komponen yaitu transmiter, sumber cahaya, detektor dan unit pengolahan data. Pada unit pengolahan data diperlukan koding dan modulator data secara digital ataupun analog (World, 2012). Sistem Komunikasi Cahaya tampak, mempergunakan modulasi intensitas baseband (IM), sinyal pemodulasi baik tunggal maupun ganda untuk mendukung penggunaan modulasi sebagai OOK (*On-Off Keying*) atau OFDM (*Orthogonal Multiplexing Division Multiplexing*). Pada model jaringan OSI (*Open System Interconnection*) sistem komunikasi cahaya tampak masuk pada lapisan PHY (*Physical*) yaitu pengiriman dan penerimaan dari *bit stream* yang belum diolah dalam bentuk fisik. Pada lapisan PHY pada umumnya dibahas komponen AFE atau *Analog Front End* berupa komponen pengolah sinyal yang digunakan pada pemancar dan penerima. Pada sistem komunikasi cahaya tampak, komponen-komponen AFE digunakan untuk mengolah sinyal sehingga komponen

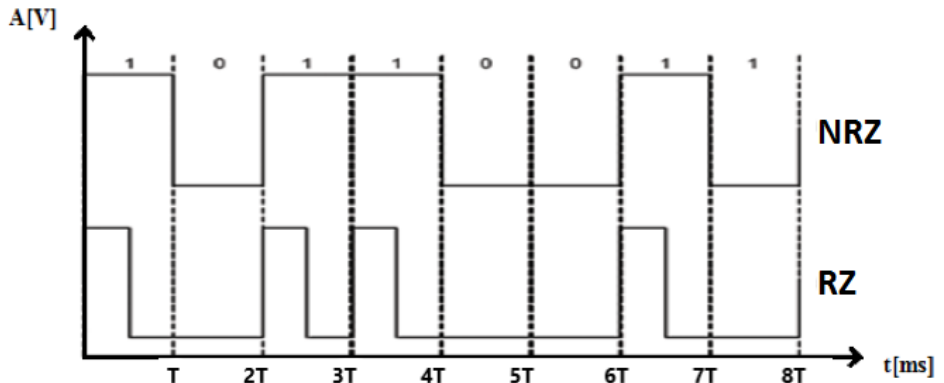
optoelektronik seperti LED (*Light Emitting Diode*) dan fotodioda dapat mengirimkan sinyal yang membawa informasi.



Gambar 2.2 Skema Sistem Komunikasi Li-Fi atau VLC (World, 2012)

2.3 Modulasi OOK-NRZ

Teknik modulasi OOK (*On-Off Keying*) merupakan teknik SCM atau *Single Carrier Modulation* dimana hanya spektrum tunggal yang dimodulasikan sebagai pembawa sinyal di suatu sistem komunikasi. Modulasi OOK mengirimkan data secara sekuensial dengan mematikan dan menhidupkan LED sehingga dapat membentuk simbol bit yang terdiri dari "1" (On) dan "0" (Off), teknik ini umumnya digunakan karena performansi pengiriman data yang baik dengan sistem yang sederhana (Haas, Yin, Wang, & Chen, 2016). Teknik modulasi kemudian dibagi menjadi 2 bagian berdasarkan *line coding* yaitu RZ (*Return Zero*) dan NRZ (*Non Return Zero*).



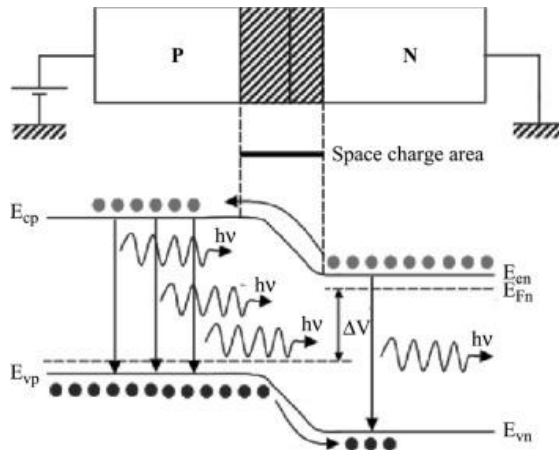
Gambar 2.3 Waveform OOK-NRZ dan OOK-RZ (Liner Andrej, 2014)

Pada gambar 3. terlihat bahwa durasi “T” pulsa suatu bit OOK-NRZ bernilai “1” tidak perlu kembali ke kondisi “0” untuk dihitung sebagai suatu nilai, dimana pada OOK-RZ pulsa bit “1” kembali ke kondisi “0” pada sebagian durasi “T”. Pada sistem komunikasi cahaya tampak, modulasi OOK-RZ memiliki efisiensi daya yang lebih tinggi dibandingkan OOK-NRZ karena hanya menggunakan daya pada sebagian durasi “T”, tetapi memiliki *bandwidth* yang lebih rendah dibandingkan modulasi OOK-NRZ (Liner Andrej, 2014). Hal ini dikarenakan pada modulasi OOK-RZ *bandwidth* signal dibagi menjadi setengah dari OOK-NRZ, dimana setengah durasi sinyal tersebut digunakan untuk kembali kepada kondisi “0”.

2.4 LED (*Light Emitting Diode*)

LED atau *Light Emitting Diode* merupakan sebuah komponen elektronik yang dapat mengemisikan energi cahaya terhadap respon arus atau tegangan listrik yang diberikan, tentunya sebagai dioda suatu LED memiliki mode *forward* dan *reverse* bias tetapi hanya pada saat *forward* bias LED dapat menghasilkan cahaya. LED terbuat dari bahan semikonduktor ekstrinsik yang terdiri dari

p & n *junction*, dimana bahan semikonduktor ekstrinsik p memiliki karier listrik *hole* sebagai mayoritas dan elektron sebagai minoritas, semikonduktor ekstrinsik n merupakan sebaliknya. LED dapat mengemisikan cahaya akibat proses rekombinasi elektron-*hole* yang terjadi pada daerah aktifnya. Proses ini terjadi saat LED diberikan arus/tegangan pada mode *forward* bias yang cukup untuk menghasilkan karier lebih pada bahan semikonduktor p & n, arus dan tegangan ini disebut sebagai *forward current* dan *forward voltage*. Berikut merupakan proses rekombinasi langsung pada LED dengan bahan semikonduktor *homojunction*.

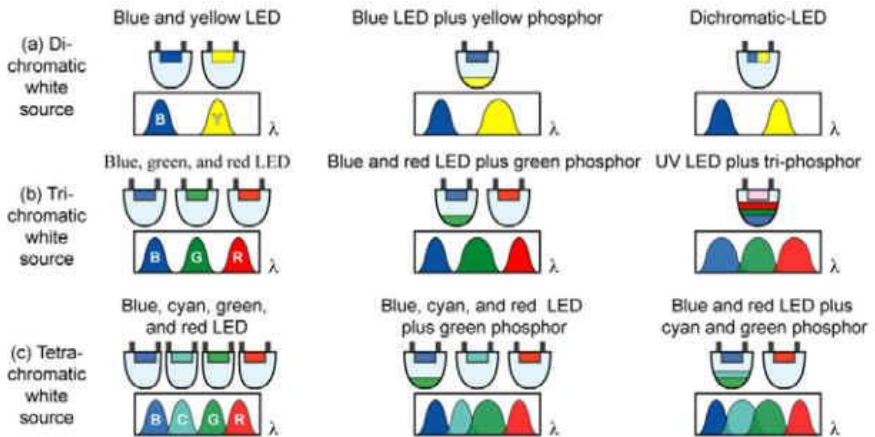


Gambar 2.4 Proses Rekombinasi Langsung Pada LED *Homojunction* (Yannick Deshayes, 2016)

Energi foton yang dihasilkan pada suatu LED ditentukan dari besarnya perbedaan tingkat energi dari tingkat energi konduktif (E_c) dan energi valensi (E_v), besaran energi foton ini didefinisikan sebagai:

$$E = h\nu \quad (1)$$

Dimana h adalah konstanta planck $6,6 \times 10^{-34}$ J.S dan ν merupakan frekuensi gelombang elektromagnetik, dan agar LED dapat mengemisikan cahaya tampak diperlukan frekuensi dalam jangkauan 3.84×10^{14} Hz (780 nm) sampai dengan 7.69×10^{14} Hz (390 nm). Untuk pencahayaan umumnya digunakan LED yang dapat mengemisikan cahaya putih, dan untuk menghasilkan cahaya putih menggunakan LED terdapat beberapa metode yaitu melalui metode dikromatik, trikromatik, dan tetrachromatik.

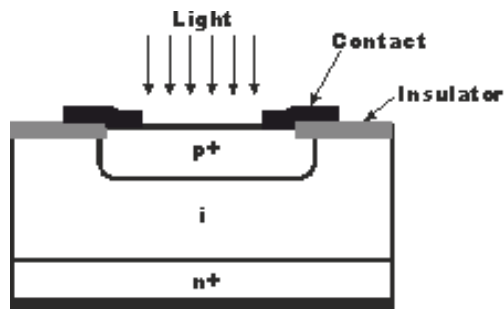


Gambar 2.5 Konfigurasi Sumber Cahaya Putih LED (Kim, 2005).

Untuk menghasilkan cahaya putih dengan cara dikromatik diperlukan 1 cahaya dengan warna utama (merah, hijau, dan biru) dan 1 cahaya dengan warna komplementer (kuning untuk biru, sian untuk merah, dan magenta untuk hijau), contohnya merupakan LED biru dengan lapisan fosfor (Ce:YAG) yang menghasilkan warna profil spektrum menyerupai kuning melalui konversi energi cahaya LED biru yang diterima oleh lapisan fosfor. Untuk cahaya trikromatik digunakan LED RGB untuk menghasilkan cahaya putih dan pada tetrakromatik digunakan tambahan LED sian untuk menghasilkan LED putih dengan karakteristik pencahayaan yang lebih baik (Kim, 2005).

2.5 Fotodiode

Fotodiode merupakan komponen elektronik yang digunakan untuk mengkonversi energi optik menjadi energi listrik dengan bahan semikonduktor yang umumnya merupakan *Silicon* ($2.500 \lambda - 11.000 \lambda$) atau *Galium Arsenida* ($8.000 \lambda - 20.000 \lambda$). Fotodiode memiliki mekanisme yang berbeda dengan LED dimana pada LED dilakukan rekombinasi *electron-hole* pada *p-n junction*. Fotodiode menghasilkan energi listrik dari generasi *electron-hole* di daerah *p-n junction*.



Gambar 2.6 Struktur material dalam fotodiode PIN (Liu).

Besarnya energi listrik yang dihasilkan pada suatu fotodiode bergantung terhadap responsivitasnya. Responsivitas fotodiode didefinisikan sebagai banyaknya arus listrik yang dihasilkan terhadap besarnya daya optik *insiden* yang diberikan kepada detektor dalam satuan ($A \cdot W^{-1}$), bila detektor foton menghasilkan tegangan listrik maka responsivitas memiliki satuan ($V \cdot W^{-1}$) yaitu merupakan besaran tegangan listrik yang dihasilkan terhadap daya optik (Liu).

$$\mathcal{R} = \frac{i_s}{P_s} \quad (A \cdot W^{-1}). \quad (2)$$

$$\mathcal{R} = \frac{v_s}{P_s} \quad (V \cdot W^{-1}). \quad (3)$$

Dimana:

i_s = sinyal arus keluaran detektor (A)

v_s = sinyal tegangan keluaran detektor (V)

P_s = daya optik insiden yang mengenai detektor (W)

Bila detektor memiliki fungsi *gain internal* maka i_s didefinisikan sebagai $i_s = G i_{ph}$ dan bila detektor tidak memiliki fungsi *gain internal* maka $G=1$. Responsivitas fotodetektor yang tidak memiliki *gain internal* disebut sebagai responsivitas intrinsik \mathcal{R}_0 dan responsivitas $\mathcal{R} = \mathcal{R}_0$ tetapi bila fotodetektor memiliki *gain internal* maka responsivitas $\mathcal{R} = G\mathcal{R}_0$. Responsivitas intrinsik kemudian diketahui dari hubungan diatas sebagai berikut:

$$\mathcal{R}_0 = \frac{i_{ph}}{P_s} \quad (4)$$

Dimana:

i_{ph} = arus detektor tanpa *gain internal* (A)

\mathcal{R}_0 = responsivitas intrinsik (A.W⁻¹)

Salah satu karakteristik dari fotodioda adalah *quantum efficiency*. *Quantum efficiency* adalah probabilitas dihasilkannya karier muatan untuk setiap foton yang diterima oleh fotodetektor. Suatu fotodetektor memiliki efisiensi kuantum eksternal η_e yang nilainya terdiri dari efisiensi kuantum internal η_i , efisiensi kuantum transmisi η_t yaitu *beam* insiden yang mengenai daerah efektif detektor, dan efisiensi kuantum koleksi η_{coll} yaitu banyaknya karier listrik yang terbentuk menjadi *photocurrent*.

$$\eta_e = \eta_{coll} \eta_t \eta_i \quad (5)$$

Respon spektral suatu detektor foton dapat direpresentasikan dengan responsivitas spektral. Responsivitas spektral dapat dicari melalui nilai responsivitas \mathcal{R}_0 yang didefinisikan melalui hubungannya terhadap panjang gelombang cahaya yang diterima.

$$\mathcal{R}_0 = \frac{i_{ph}}{P_s} = \eta_e \frac{e}{h\nu} \quad (6)$$

Dimana:

η_e = efisiensi kuantum eksternal

e = muatan elektron ($1,6 \times 10^{-19}$ C)

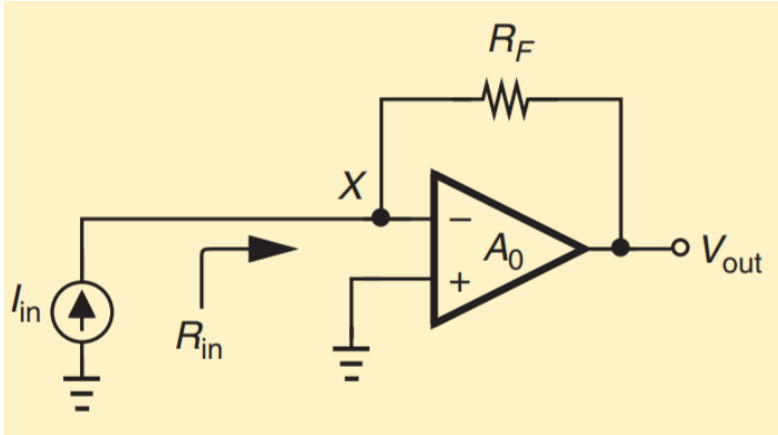
h = konstanta planck ($6,6 \times 10^{-34}$ J.S)

ν = frekuensi sumber cahaya (S^{-1})

Dapat dilihat bahwa responsivitas \mathcal{R}_0 memiliki fungsi frekuensi gelombang elektromagnetik . Menggunakan persamaan (5) dapat dibentuk responsivitas spektral $\mathcal{R}(\lambda)$

2.6 TIA (*Transimpedance Amplifier*)

Transimpedance Amplifier merupakan penguat umpan balik Op-Amp yang digunakan sebagai pemerkuat dan konverter arus menjadi tegangan. Skematik penggunaan TIA pada rangkaian penerima arus adalah sebagai berikut:



Gambar 2.7 Skematik TIA Sebagai Penerima Arus (Razavi, 2019).

Arus dikonversi menjadi tegangan listrik melalui hukum Ohm $V=I.R$ dimana pada kasus ini sumber arus $I_{in}(A)$ dan dengan adanya impedansi $R_T(\Omega)$ akan dihasilkan tegangan $V_{out}(V)$ yang proporsional terhadap impedansi $R_{in}(\Omega)$. Besarnya *gain* TIA ditentukan oleh impedansi $R_T(\Omega)$, dan besar $R_T(\Omega)$ ditentukan oleh parameter $R_{in}(\Omega)$ sebagai rumus berikut:

$$R_T(\Omega) = \frac{V_{out}(V)}{I_{in}(A)} \quad (9)$$

$$R_{in}(\Omega) = R_f(\Omega)/(1 + A_o) \quad (10)$$

$$R_T(\Omega) = \frac{-I_{in}(A) \times R_{in}(\Omega) \times A_o}{I_{in}(A)} \quad (11)$$

$$R_T(\Omega) = \frac{-A_o}{(1+A_o)} \times R_f(\Omega) \quad (12)$$

Dimana:

$I_{in}(A)$: Sumber arus yang diterima oleh TIA

$R_{in}(\Omega)$: *Input* impedansi sumber arus kepada TIA

A_o : *Open-loop gain* dari TIA

$R_f(\Omega)$: Impedansi umpan balik TIA

$R_T(\Omega)$: Impedansi *overall* yang berfungsi sebagai *gain* TIA

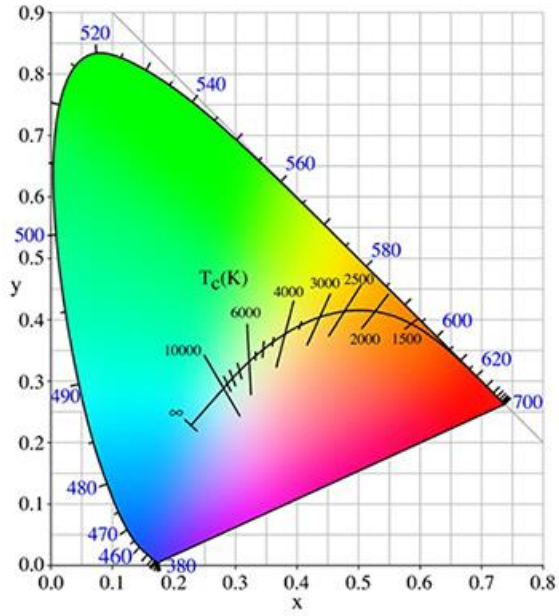
Pada rumus (10) dapat dinyatakan bahwa impedansi *input* $R_{in}(\Omega)$ bergantung terhadap impedansi umpan balik $R_f(\Omega)$, dan pada rumus (11) dapat ditentukan bahwa untuk memperkuat *gain* TIA yaitu $R_T(\Omega)$, nilai impedansi $R_f(\Omega)$ dapat diubah dengan mengganti resistor rangkaian. Karena Op-Amp memiliki nilai A_o *Open-loop gain* yang sangat tinggi maka persamaan (12) dan (9) dapat berubah menjadi:

$$R_T(\Omega) \approx R_f(\Omega) \quad (13)$$

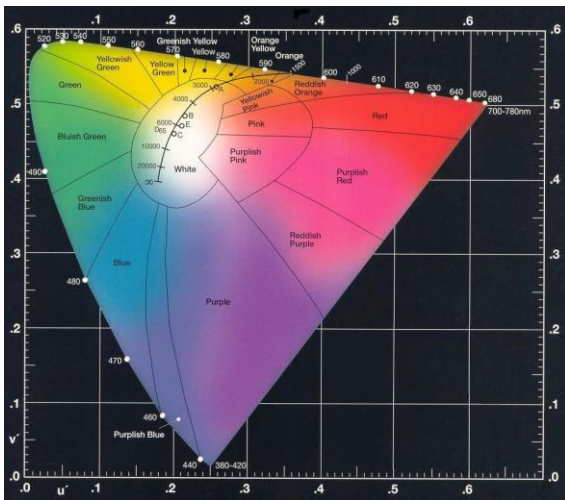
$$R_f(\Omega) \approx \frac{V_{out}(V)}{I_{in}(A)} \quad (14)$$

2.7 Chromaticity

Chromaticity didefinisikan sebagai parameter yang menilai *hue* (spektrum dominan) dan *saturation* (spektrum komplementer) dari warna yang dihasilkan oleh suatu sumber cahaya tanpa menilai *luminance* (intensitas cahaya per satuan ruangan) yang dihasilkan. *Chromaticity* sumber cahaya dapat dinilai menggunakan CIE *color space* 1931 & 1976 yang dibentuk oleh CIE (*Commission Internationale de l'Eclairage*) sebagai standar di industri pencahayaan. Warna suatu sumber cahaya dapat dinilai menggunakan koordinat pada CIE *color space* 1931 (x,y) & 1976 (u,v) (Rensselaer Polytechnic Institute, 2004).



Gambar 2.8 CIE Color Space 1931 (Keeping, 2015).



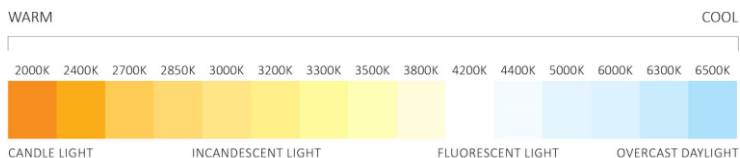
Gambar 2.9 CIE Color Space 1976.

CIE *color space* 1931 & 1976 dibentuk berdasarkan distribusi spektral daya yang diterima oleh mata manusia, sehingga dengan sistem ini didapatkan hubungan antara distribusi daya spektral suatu sumber cahaya dan kemampuan yang dimiliki untuk menghasilkan persepsi warna kepada mata manusia. Pada gambar 7. dan 8. pada bagian putih *color space* dapat dilihat bahwa ada garis melengkung dengan satuan (K°), garis melengkung tersebut digunakan untuk menilai CCT dari warna sumber cahaya yang terletak pada bagian tersebut. Hubungan ini dapat dituliskan dengan rumus:

$$n = \frac{(x - 0.3320)}{(y - 0.1858)} \quad (7)$$

$$CCT = -437n^3 + 3601n^2 - 6861n + 5514.31 \quad (8)$$

Maka dengan didapatkan koordinat *chromaticity* (x,y), nilai CCT dapat dihitung untuk menilai warna putih dari suatu sumber cahaya (Li, et al., 2016). CCT atau *Correlated Color Temperature* merupakan korelasi antara warna cahaya yang dihasilkan dengan warna emisi saat benda hitam mengemisikan cahaya di temperatur yang tinggi. Semakin rendah suhu CCT maka warna cahaya disebut sebagai warna *warm* dan semakin tinggi nilai CCT maka warna disebut sebagai *cool*. Kategori CCT dapat dilihat sebagai pada gambar berikut:



Gambar 2.10 CCT Temperatur LED (Elemental LED, Inc., 2015).

2.8 CRI (*Color Rendering Index*)

CRI merupakan salah satu parameter penting dalam menentukan kualitas dari sumber cahaya, CRI atau *Color Rendering Index* merupakan indeks warna yang menilai tingginya kedekatan warna objek yang dihasilkan oleh sumber cahaya dibandingkan dengan warna suatu objek yang dihasilkan oleh sumber cahaya referensi berupa matahari dengan CRI 100. Maka CRI dari suatu LED menilai kemampuan sebuah sumber cahaya untuk menghasilkan warna yang se-alami mungkin. Untuk mengukur CRI telah dibuat standar oleh CIE dimana diperlukan 8 sampel uji coba untuk pencahayaan warna, tes sampel ini memiliki nilai RGB (242, 185, 158); (206, 177, 82); (128, 186, 76); (0, 168, 166); (0, 159, 222); (0, 134, 205); (165, 148, 198); (233, 155, 193). Pengukuran setiap nilai *rendering* untuk sampel tersebut dapat diukur sebagai berikut:

$$R_i = 100 - 4.6\Delta E_i \quad (9)$$

Dimana ΔE_i merupakan nilai perbedaan warna uji cahaya iluminasi dengan standar iluminasi untuk sampel $i=1$ sampai $i=8$. Nilai CRI umum berupa R_a kemudian bisa didapatkan dengan rata-rata 8 sampel tersebut (Y.-L. Li, 2004):

$$R_a = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 R_i \quad (10)$$

Dengan didapatkannya CRI R_a , maka sumber cahaya dapat dikategorikan kualitasnya sesuai standar.

2.9 BER (*Bit Error Rate*)

Pada jaringan komunikasi secara umum, BER atau *Bit Error Rate* merupakan parameter yang digunakan untuk menilai seberapa banyak error bit dari bit stream yang dikirimkan (S. M. Jahangir Alam, 2011). Maka bila banyaknya bit error yang terkirim tertulis sebagai:

$$BER = \frac{N_e}{N_T} \quad (14)$$

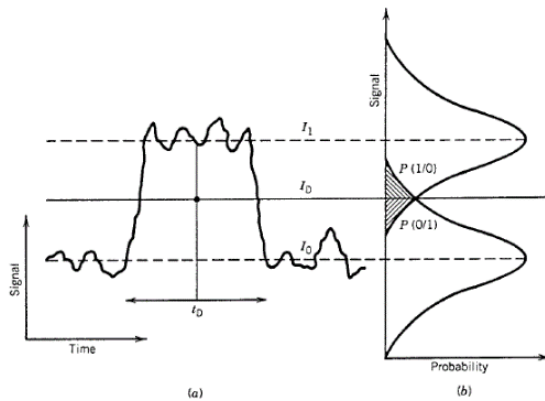
Dimana:

N_e : Banyaknya bit yang dinyatakan sebagai *error*

N_T : Total bit yang ditransmisikan melalui sistem

BER : Laju banyaknya bit yang dinyatakan sebagai *error* terhadap bit total yang ditransmisikan.

Contohnya adalah BER dengan nilai 10^{-9} maka hanya terdapat 1 error bit dari pengiriman 10^9 bit stream. Pada sistem komunikasi, nilai BER pada umumnya harus berada pada rentang nilai BER $10^{-9} - 10^{-12}$ sehingga data yang diterima oleh pengguna dapat merepresentasikan data terkirim yang sebenarnya.



Gambar 2.11 (a) Sinyal yang terdistorsi (b) probabilitas kemunculan bit 0 dan 1 (Agrawal, 2002).

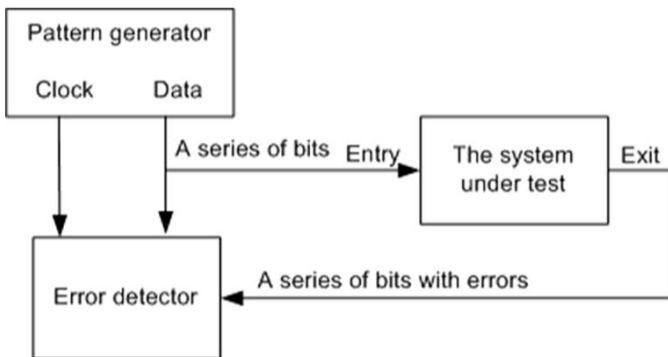
$$BER = P_e(Q) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{e^{-Q^2/2}}{Q} \quad (15)$$

BER juga dapat dinyatakan sebagai *error probability* (P_e). *Error probability* $P_e(Q)$ merupakan probabilitas terjadinya bit 1

dan 0 pada sinyal yang terdistorsi, penentuan bit pada sinyal berada pada axis I_D pada gambar 10. Besarnya nilai $P_e(Q)$ bergantung terhadap kualitas sinyal yang dinilai dengan Q-factor, maka semakin kecilnya nilai Q-factor akan mengakibatkan nilai $P_e(Q)$ yang tinggi dengan indikasi daerah yang terarsir pada gambar 11.

$$Q = \frac{b_{on}-b_{off}}{\sigma_{on}+\sigma_{off}} \quad (16)$$

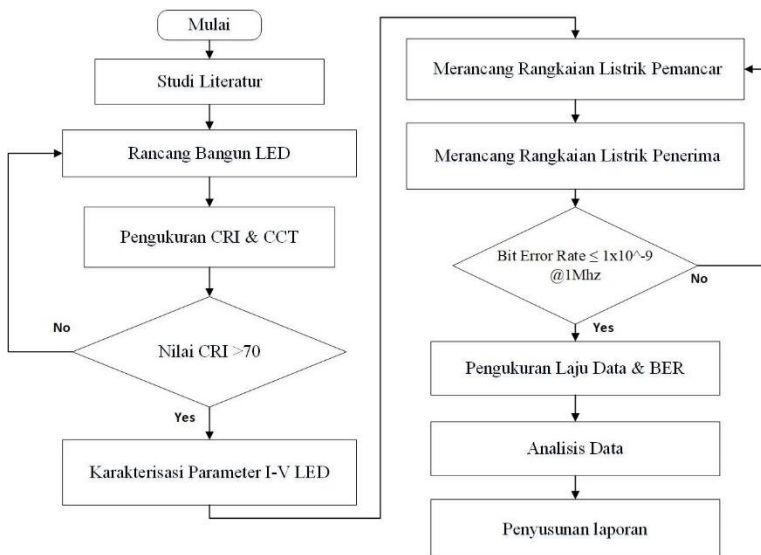
Nilai Q-factor dapat dihitung melalui persamaan 13 dimana b dan σ adalah rata-rata dan varians kemunculan bit 1 dan 0. BER diukur menggunakan instrumen BER Tester (BERT). BERT memiliki 2 komponen yaitu *pattern generator* dan *error detector*. *Pattern generator* mengirimkan bit *pattern* kepada sistem yang sedang diuji. Sedangkan *error detector* mendeteksi error dengan membandingkan bit *pattern* yang telah melewati sistem dengan bit *pattern* yang langsung dikirimkan oleh *pattern generator*, kemudian dengan bantuan *sinyal clock*, bit *pattern* yang dikirimkan dan melewati sistem menjadi sinkron (Mitic, Lebr, & Markov, 2012)



Gambar 2.12 Prinsip kerja BER-Tester (Mitic, Lebr, & Markov, 2012).

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Tahapan yang dilakukan dalam Tugas Akhir ini ditampilkan dengan sebuah diagram alir (*flowchart*) pada Gambar 3.1. Seluruh proses penelitian dan pengukuran yang dilakukan pada PTE-BPPT Laboratorium Fotonika dan Departemen Teknik Fisika ITS pada bulan Maret 2019 sampai dengan Juni 2019.



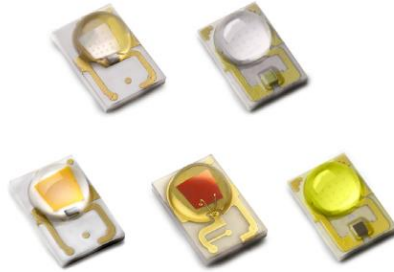
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.1 Studi Literatur

Studi literatur meliputi pemahaman konsep topik penelitian, sumber literatur akan diambil dari buku dan jurnal-jurnal yang telah ditinjau mengenai sistem komunikasi cahaya tampak khususnya pada jurnal yang memanfaatkan LED fosfor dan RGB menggunakan teknik modulasi OOK-NRZ serta literatur mengenai karakteristik pencahayaan dari suatu sumber cahaya.

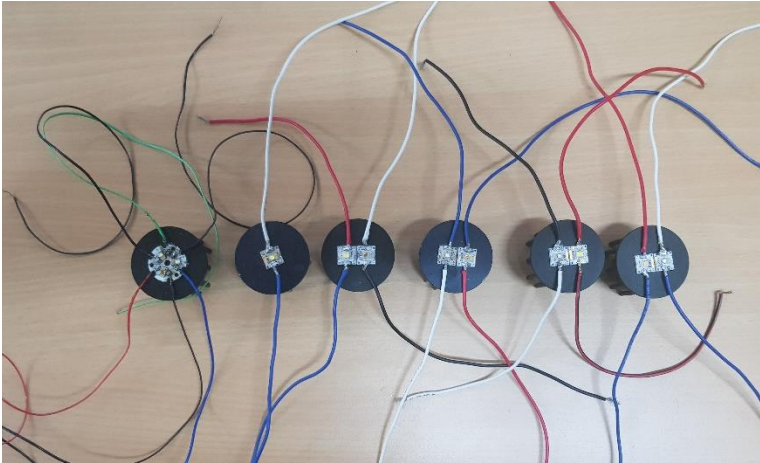
3.2 Rancang Bangun LED

LED putih dikromatik dirancang menggunakan seri LED Luxeon Rebel Color Line. Kombinasi cahaya putih terdiri dari 2 LED akan dilakukan dengan LED berwarna Biru-Kuning, Biru-Jingga, Merah-Lime, Biru-Lime. Kemudian LED Cool White Fosfor dan RGB juga dirancang sebagai pembanding.



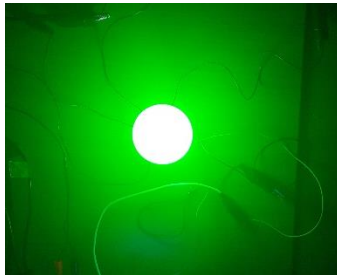
Gambar 3.2 LED Rebel Luxeon Color Line

LED Rebel Luxeon memiliki ukuran diameter sebesar 3,17mm sehingga untuk memberikan *forward voltage* secara efektif kepada LED, maka LED disolder pada PCB Logam berukuran 10mm (untuk LED tunggal) & 20mm (untuk tri-LED) kemudian agar LED dapat bekerja secara optimal pada arus yang tinggi PCB logam diberikan lapisan adhesif dan dipasang kepada *heat sink* 9,5°C/W.



Gambar 3.3 Rancangan LED

Bila diurutkan dari kiri, rancang bangun LED tersebut adalah RGB, Cool White Phosphor, Lime-Red, Biru-Jingga, Biru-Lime, dan Jingga Fosfor-Biru. Untuk menguji bila LED dapat digunakan maka setiap LED dihidupkan diatas tegangan V_f yang dimiliki.



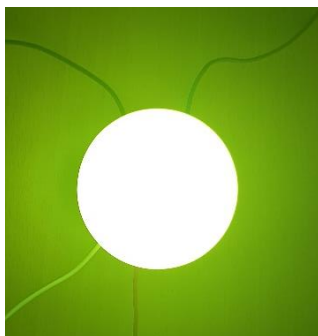
Gambar 3.4 LED Hijau



Gambar 3.5 LED Biru



Gambar 3.6 LED Merah



Gambar 3.7 LED Lime



Gambar 3.8 LED Jingga



Gambar 3.9 LED Jingga Fosfor

3.3 Pengukuran *Chromaticity*, CRI & CCT

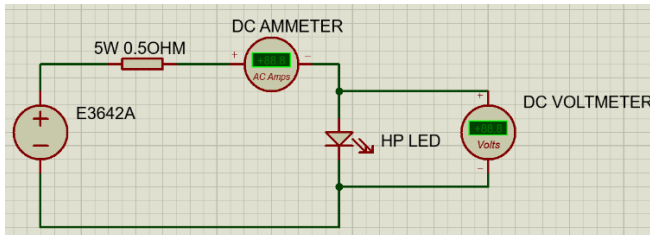
Pengukuran CRI & CCT dilakukan menggunakan spectrometer sekonic C-7000 pada mode pengukuran *ambient* (pengukuran dari 1 sampai 200.000 lux dan 1.563 sampai 100.000K). Spectrometer bekerja dengan mengukur iradiansi spektral ($W \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1}$) dari emisi spektrum cahaya tampak tiap LED. Spektrometer kemudian mengubah nilai iradiansi spektral menjadi radiansi spektral ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot nm^{-1}$), nilai radiansi spektral digunakan untuk mencari *chromaticity* berdasarkan model *color matching* (CIE 1931) yang mendeskripsikan respon cone warna mata manusia. Setelah *chromaticity* ditemukan CCT dengan persamaan (7) dan (8). Untuk mencari CRI, digunakan koordinat *chromaticity* dari CIE 1964 dan dihitung jarak ΔE_i dari koordinat kepada standar *illuminant* (*illuminant* berdasarkan nilai

CCT), kemudian dimasukkan nilai ΔE_i kepada persamaan (9) dan didapatkan CRI pada persamaan (10).

Tiap LED diberikan V_f diatas tegangan *threshold* yang diperlukan untuk menghasilkan emisi spektrum dengan arus dari 50mA sampai dengan 700mA dengan interval 50mA. Pada kondisi ruangan gelap, spectrometer diletakkan 30cm dari rancangan LED untuk mengukur *chromaticity*, CRI, & CCT. Bila rancang bangun LED tidak mencapai nilai CRI diatas 70 maka kombinasi LED tersebut tidak dapat memenuhi standar SNI pencahayaan buatan (03-6575-2001) untuk menghasilkan warna yang baik pada suasana perkantoran.

3.4 Karakterisasi Parameter LED

Untuk kombinasi LED yang telah mencapai nilai CRI diatas 70, dilakukan karakterisasi parameter untuk LED yang akan dimodulasikan. Karakterisasi parameter yang dilakukan adalah perubahan arus terhadap tegangan yang melewati LED ($I-V_d$), hubungan perubahan arus terhadap tegangan sumber ($I-V_s$), dan perubahan keluaran optik (dalam lux) terhadap tegangan sumber yang diberikan ($L-V_s$). Ketiga hubungan ini dicari untuk mencari titik operasi bias paling efektif untuk transmisi data berupa sinyal OOK-NRZ. Skematik pengambilan data LED adalah sebagai berikut:



Gambar 3.10 Skematik Pengukuran Karakteristik LED

Pengambilan data arus dan tegangan dilakukan dengan mengubah keluaran arus DC logic power supply E3642A dengan resolusi perubahan 50mA. Beban yang digunakan untuk LED disesuaikan agar LED tidak rusak dalam proses biasing melalui hukum daya $P=I.V$, pada pengukuran ini digunakan beban

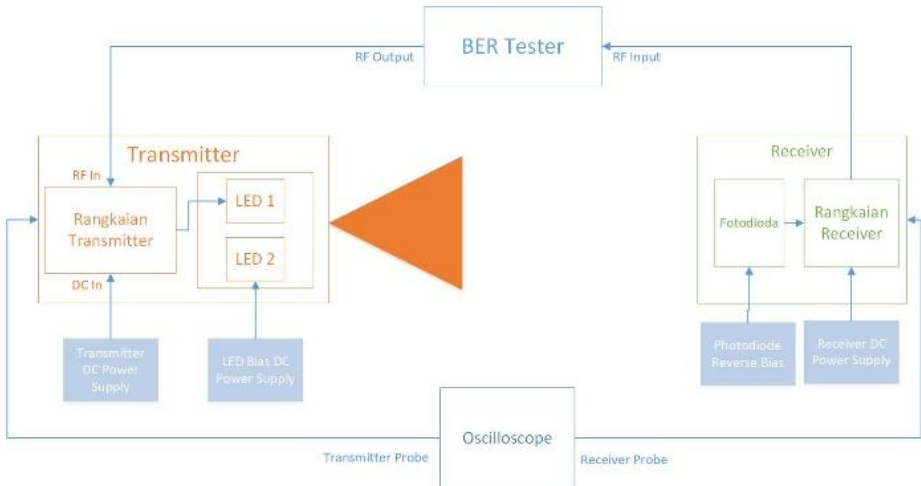
resistor daya (5W) 0.5Ω . Parameter yang dihitung berupa V_s (tegangan supply dari DC logic power supply) yang diamati dari logic power supply, V_d (tegangan yang melewati LED) diukur menggunakan probe multimeter (sebagai DC Voltmeter) dari kaki positif LED dan kaki negatif LED, kemudian I (mA) arus dari bacaan multimeter (sebagai DC Ammeter) dan layar DC logic power supply. Pengukuran dilakukan 5x naik turun secara berturut-turut dari range arus 0-700mA. Hasil pengukuran naik dan turun masing-masing dirata-ratakan dan dibandingkan, error histeresis dihitung menggunakan persamaan. Untuk pengukuran keluaran optik dalam satuan iluminansi Lux digunakan spektrometer C-7000 pada mode pengukuran ambien, spektrometer diletakkan tepat tegak lurus dari LED pada jarak 30 cm dan pada kondisi dimana spektrometer hanya menerima cahaya LED. Daerah dan titik operasi linier LED didapatkan dengan tahap sebagai berikut:

1. Melakukan *fitting* persamaan untuk hubungan I - V_d , I - V_s , dan L - V_s .
2. Menguji persamaan L - V_s dengan memasukkan nilai V_s dari batas bawah sampai batas atas, sehingga didapatkan nilai iluminansi L .
3. Daerah keluaran iluminansi L dengan perkiraan yang paling linier dicari dengan membandingkan perubahan nilai iluminansi dari nilai pertama dengan kedua, kedua dengan ketiga, dst. Daerah L dengan perubahan *slope* yang linier diperkirakan dan ditentukan.
4. Nilai V_s pada daerah L tersebut ditentukan dengan hubungan L - V_s sebagai daerah operasi *quasi* linier LED dari sumber tegangan V_s , batas atas dan batas bawah V_s dijumlahkan dan dibagi 2 untuk mencari titik operasi bias V_s . V_{pp} (*peak to peak voltage*) sinyal adalah batas atas V_s dikurangi batas bawah V_s .

- Untuk memperkirakan daerah *quasi* linier dari V_d (tegangan yang melalui LED) maka hubungan $I-V_s$ dan $I-V_d$ digunakan.

3.5 Merancang Sistem Visible Light Communication

Rancangan blok sistem untuk komunikasi cahaya tampak menggunakan LED Putih Dikromatik adalah seperti pada gambar 3.5.



Gambar 3.11 Blok Sistem Komunikasi Cahaya Tampak

Pada sistem komunikasi cahaya tampak terdapat komponen-komponen utama:

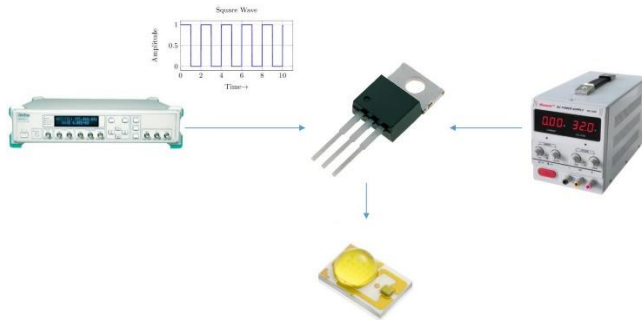
- Pengirim data nirkabel LED
- Rangkaian transmitter berupa modulator analog LED
- Penerima sinyal optik fotodiode
- Rangkaian receiver pemerkuat sinyal fotodiode
- Sumber tegangan DC
- Sumber serta pengolah sinyal RF (BER Tester dan Microcontroller)

Proses cara kerja sistem adalah sebagai berikut:

1. Komponen sumber sinyal RF (pada kasus ini sinyal merupakan sinyal analog modulasi OOK-NRZ yang dihasilkan oleh BER Tester) dikirimkan kepada rangkaian transmitter.
2. Rangkaian transmitter yang berfungsi sebagai modulator analog LED, menerima sinyal RF. Bila sinyal DC tidak diberikan oleh power supply maka LED tidak diberikan bias diatas V_{th} dan tidak bisa hidup. Bila power supply memberikan power supply DC diatas tegangan threshold LED maka LED dapat dihidupkan. Rangkaian transmitter yang berfungsi sebagai modulator analog memberikan komponen RF kepada DC bias sehingga LED diaktifkan dengan pola sinyal RF yang diberikan.
3. Fotodioda menerima sinyal optik LED yang memiliki komponen RF menjadi satuan arus listrik. Untuk memperkuat sinyal tersebut maka komponen TIA (*Transimpedance Amplifier*) perlu digunakan pada rangkaian listrik penerima. TIA mengkonversikan arus fotodioda menjadi tegangan dengan komponen RF yang dikirimkan oleh LED.
4. Sinyal komponen RF diterima kembali oleh BER Tester untuk melakukan pengukuran banyaknya error bit per banyaknya seluruh bit yang terkirimkan.

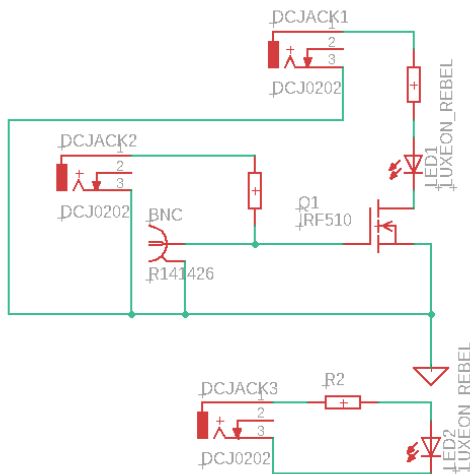
3.5.1 Rancangan Rangkaian Transmitter

Sistem transmitter yang telah dibentuk adalah sebagai berikut:



Gambar 3.12 Sistem Transmitter Komunikasi Cahaya Tampak

Berikut merupakan skematik rangkaian listrik dari transmitter:



Gambar 3.13 Skematik Rangkaian Transmitter

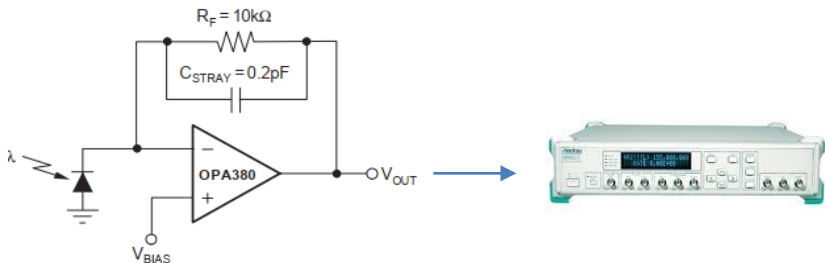
Komponen pada transmitter terdiri dari

- IC Power Mosfet IRF510
- Resistor
- Rancang bangun LED

Rangkaian transmiter diberikan sinyal OOK-NRZ dari *pattern generator* melalui konektor BNC. MOSFET IRF510 digunakan sebagai modulator analog pada rangkaian transmiter dengan cara memanfaatkan MOSFET untuk *switching*. Untuk dilakukan *switching* diperlukan tegangan V_{gs} yang masuk kepada *gate* MOSFET, tegangan V_{gs} dikirimkan dengan DCJACK2. Sinyal OOK-NRZ dari *pattern generator* berfungsi sebagai osilator untuk V_{gs} sehingga dapat dihasilkan pola on-off yang menyerupai sinyal pada V_{ds} yaitu tegangan yang melewati kaki *drain* dan *source* MOSFET. V_{ds} dikirimkan dari DCJACK1 untuk memberikan tegangan/ arus bias kepada LED, resistor juga digunakan sebagai pelindung untuk arus yang berlebihan. Untuk LED kedua yang tidak diberikan sinyal OOK-NRZ hanya akan diberikan DC bias melalui DCJACK3.

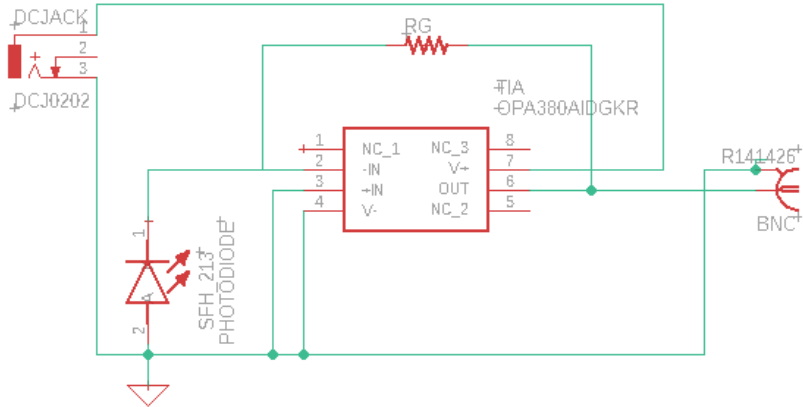
3.5.2 Rancang Bangun Receiver

Sistem Receiver yang dibentuk adalah sebagai berikut:



Gambar 3.14 Sistem Receiver Komunikasi Cahaya Tampak

Dengan skematik rangkaian lebih detail sebagai berikut:



Gambar 3.15 Skematik Rangkaian Receiver

Komponen pada receiver terdiri dari:

- Fotodiode SFH 213
- TIA OPA380

Fotodiode SFH213 menerima sinyal LED dan dikonversikan dalam bentuk sinyal arus, TIA OPA 380 menerima arus fotodiode pada ujung kaki katoda. TIA OPA380 menerima sumber tegangan dari DCJACK untuk beroperasi secara optimal. TIA OPA 380 mengkonversikan sinyal arus menjadi tegangan sesuai dengan resistor gain R_g yang ditentukan. Sinyal dalam bentuk tegangan kemudian diterima oleh konektor BNC yang disambungkan kepada *error detector* BERT untuk mengukur BER. Sistem komunikasi diuji dengan mengukur SNR (*Signal to Noise Ratio*) pada ujung receiver dengan fungsi *RF spectrum analyzer* osiloskop MDO3054. Nilai SNR diatas 20 dB pada jarak 0,5 sampai 1m ditetapkan untuk menilai kesuksesan kualitas sistem.

3.6 Pengukuran Laju Data & BER

Pengukuran laju data dan BER dilakukan untuk setiap rancang bangun LED dengan nilai CRI diatas 70. Pengukuran dilakukan pada 1 jarak untuk semua LED sebagai parameter tetap. Pengukuran *Bit Error Rate* untuk setiap LED akan dihentikan saat BER telah mencapai nilai setinggi $1E-02$. Sinyal yang dikirimkan oleh BERT Anritsu MP8931A adalah sinyal OOK-NRZ dengan pseudorandom bit sequence PN23 sehingga parameter BER yang diukur dapat dianggap sebagai proses yang acak. Kemampuan setiap rancang bangun LED untuk mengirimkan data pada sistem kemudian dibandingkan untuk mendapatkan suatu kesimpulan. BER diukur dengan BERT Anritsu MP8931A.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV HASIL & PEMBAHASAN

Pada bab ini dibahas data dan hasil yang telah didapatkan sesuai metodologi penelitian pada bab III. Pada subbab 4.1 akan dibahas mengenai data *chromaticity*, CRI, dan CCT dari rancang bangun LED yang dibentuk dan akan dianalisa bila rancang bangun mencapai nilai CRI yang ditentukan. Pada subbab 4.2 akan dibahas mengenai karakterisasi parameter IV LED serta hubungannya dalam menghasilkan cahaya dalam satuan Lux. Pada subbab 4.3 dibahas mengenai hasil SNR dan BER dari rangkaian yang dibentuk.

4.1 *Chromaticity*, CRI & CCT Rancang Bangun LED

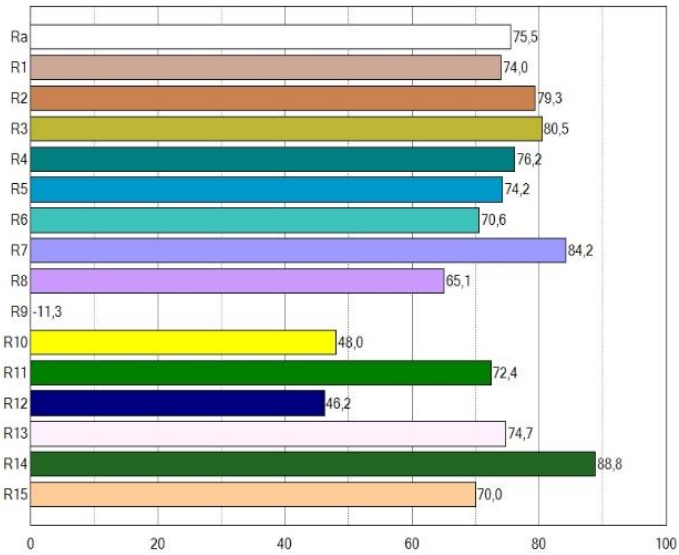
Rancang bangun LED Cool White Phosphor, Biru-Kuning, Biru-Jingga, Lime-Red, Lime-Blue, dan RGB didapatkan nilai *chromaticity*, CRI & CCT dengan spectrometer sekonic C-7000:

4.1.1 Cool White Phosphor

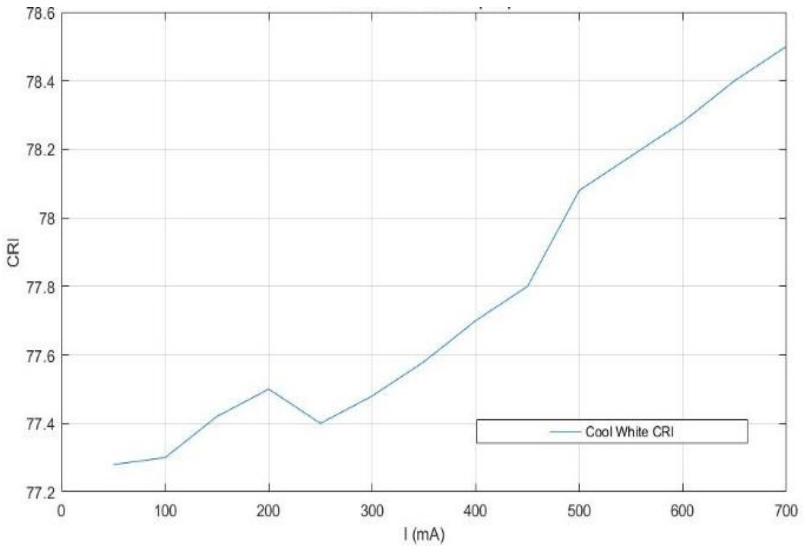
LED Cool White Phosphor memiliki nilai CCT, CRI dan bentuk spektrum sebagai berikut:



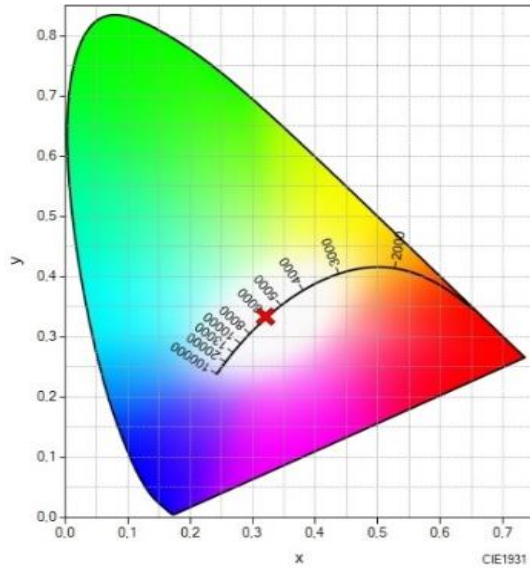
Gambar 4.1 LED Cool White Phosphor



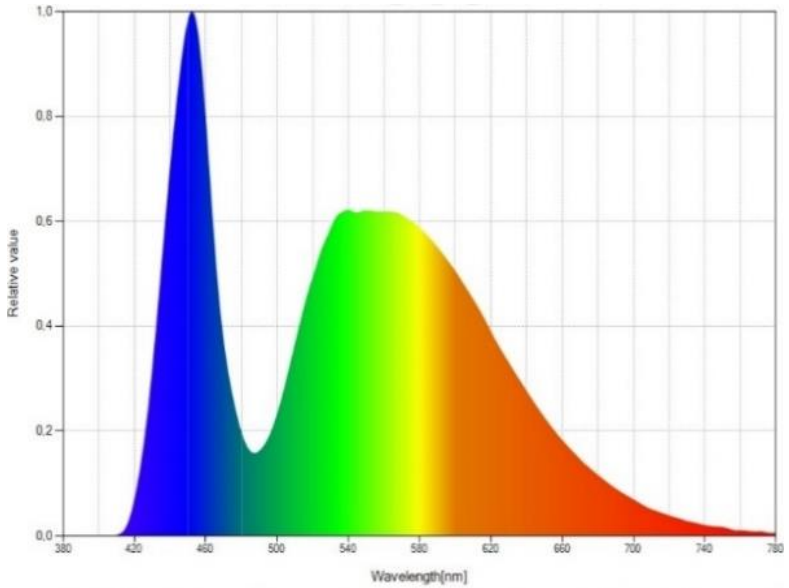
Gambar 4.2 CRI LED Cool White



Gambar 4.3 CRI LED Cool White vs I(mA)



Gambar 4.4 Chromaticity & CCT LED Cool White



Gambar 4.5 Panjang Gelombang LED Cool White

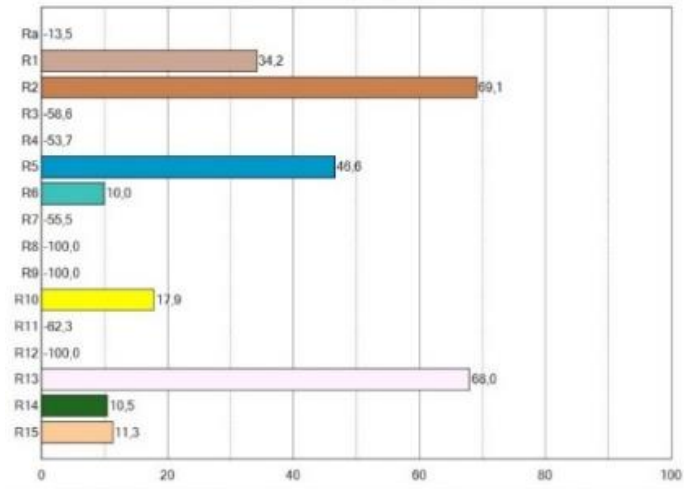
LED Cool White Phosphor memiliki CRI dengan nilai 75,5, CCT 6084 dengan koordinat warna “*chromaticity*” (0,3203;0,3339) untuk CIE 1931 (x;y) dan (0,212;0,4720) untuk CIE 1976 (u' ; v') dengan jarak koordinat terhadap *planckian locus* Δ_{uv} sebesar 0,002. Pada gambar 4.5 dapat dilihat bahwa puncak spektrum dari profil spektrum secara keseluruhan didapatkan pada 452nm, hal ini dikarenakan bahan semikonduktor LED biru digunakan sebagai dasar LED putih berlapisan fosfor. Komponen fosfor (Ce:YAG) dari LED Cool White Phosphor membantu menghasilkan profil spektrum (487-780nm) yang lebar dimana profil spektrum komponen fosfor memiliki FWHM (*Full Width at Half Maximum*) yaitu 127nm pada puncak spektrum fosfor 540nm. Profil spektrum fosfor tersebut membantu meningkatkan CRI seperti yang didapatkan pada gambar 4.5 karena memiliki komponen warna dari spektrum hijau, kuning, dan beberapa spektrum merah. Berdasarkan gambar 4.2 dan gambar 4.3 CRI dari LED Cool White Phosphor melewati batas yang ditentukan yaitu 70 dan memiliki nilai CRI tertinggi yaitu 78,5 saat dialirkan arus listrik 700 mA, LED ini akan digunakan untuk membandingkan performansi komunikasi untuk LED putih dikromatik yang dirancang dan memiliki CRI diatas 70.

4.1.2 Biru & Jingga

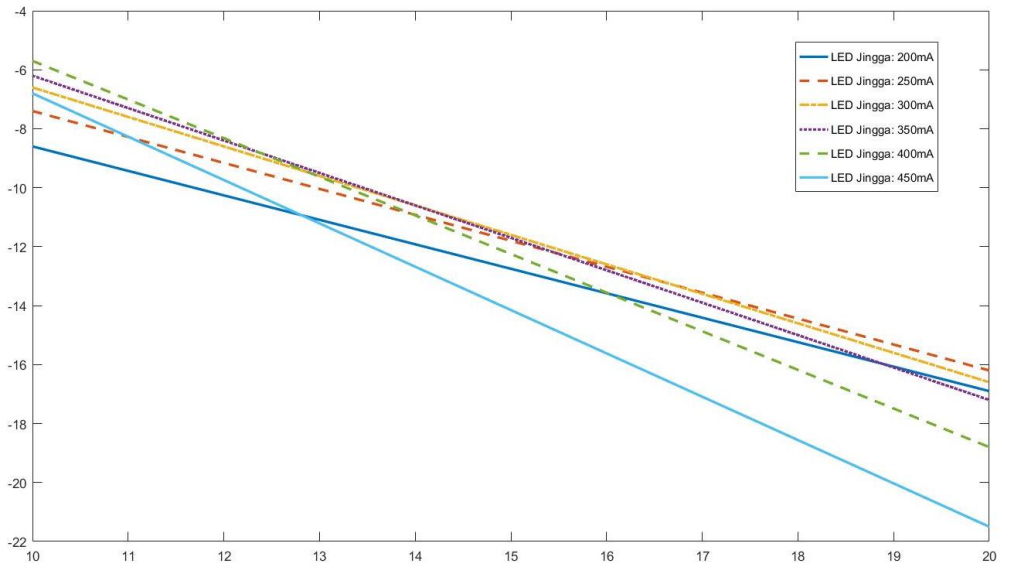
Kombinasi LED biru & kuning memiliki nilai *chromaticity*, CCT, CRI dan bentuk spektrum sebagai berikut:



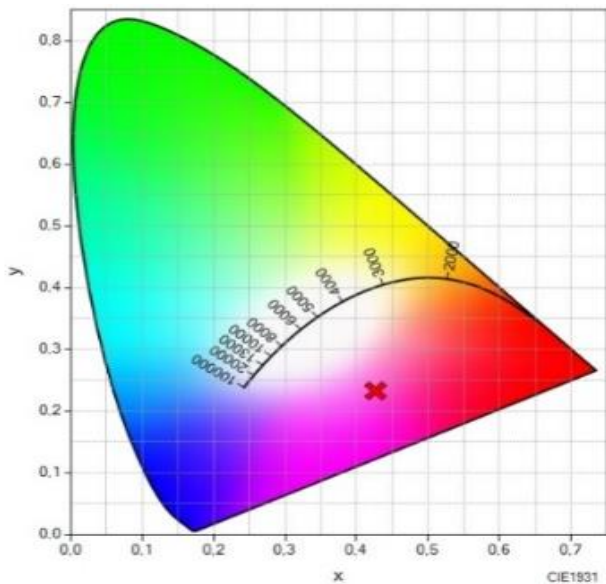
Gambar 4.6 LED Biru & Jingga



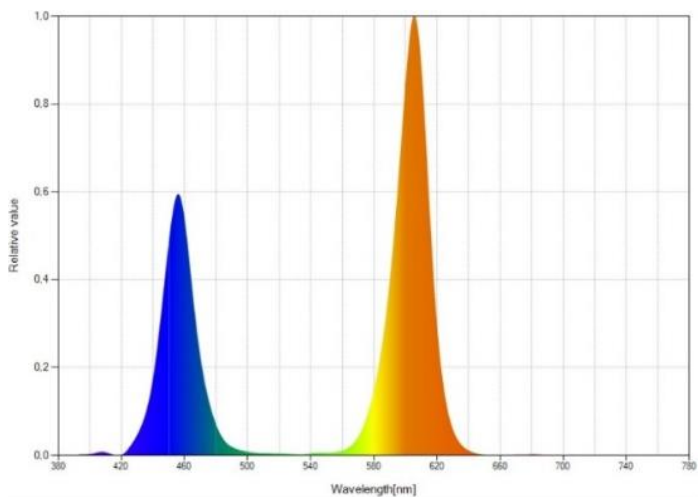
Gambar 4.7 CRI LED Biru & Jingga



Gambar 4. 8 CRI Biru-Jingga vs I(mA) LED Biru



Gambar 4.9 Chromaticity & CCT LED Biru & Jingga

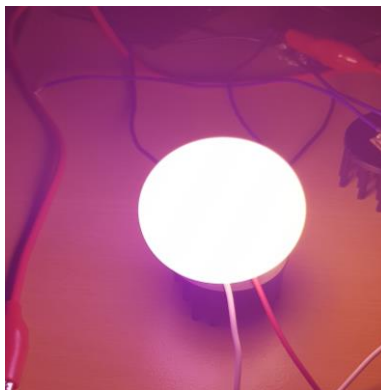


Gambar 4.10 Panjang Gelombang LED Biru & Jingga

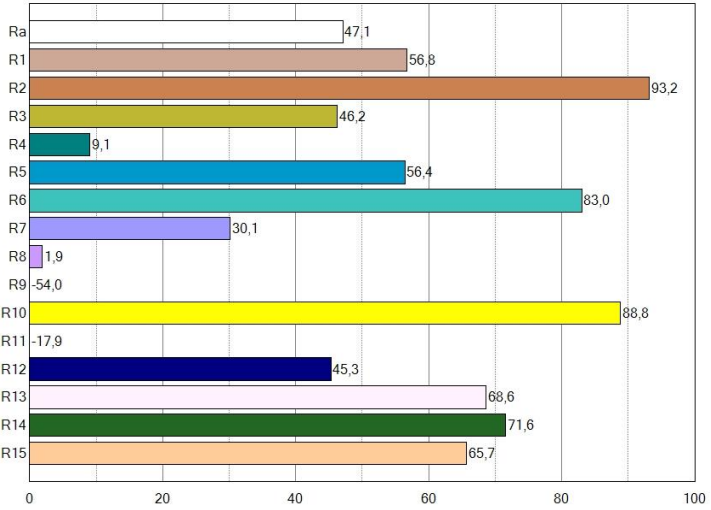
LED biru (450nm) dan jingga (590nm) dikombinasikan dan didapatkan nilai CRI -13,5, CCT 1595K, dan nilai *chromaticity* (0,4263;0,2372) untuk CIE 1931 (x;y) dan (0,3452;0,4240) untuk CIE 1976 (u' ; v') dengan jarak koordinat terhadap *planckian locus* Δ_{uv} sebesar -0.0779. Pada eksperimen ini warna spektrum biru dan jingga diuji pada uji tegangan tertentu untuk menghasilkan nilai CRI yang maksimal. Pada gambar 4.6 dapat dilihat bahwa warna yang dihasilkan lebih cenderung kepada warna magenta, hal ini dapat terjadi karena spektrum LED jingga yang dihasilkan memiliki komponen warna oranye (590–625nm) yang lebih dominan dari komponen warna kuning (565–590nm) sehingga didapatkan koordinat seperti pada gambar 4.9. Pada gambar 4.7 nilai CRI negatif didapatkan karena profil spektrum yang sempit dari LED jingga (FWHM=23nm) yang terpuncak pada 606nm sehingga tidak dapat merepresentasikan warna lain seperti warna hijau dan tidak cukup merepresentasikan sebagian besar komponen merah. Untuk rancang bangun LED biru dan jingga didapatkan CRI tertinggi bernilai -5,7 saat diberikan arus pada 10mA pada biru dan 500mA pada jingga seperti yang dapat terlihat pada gambar 4.8.

4.1.3 Biru & Jingga Fosfor

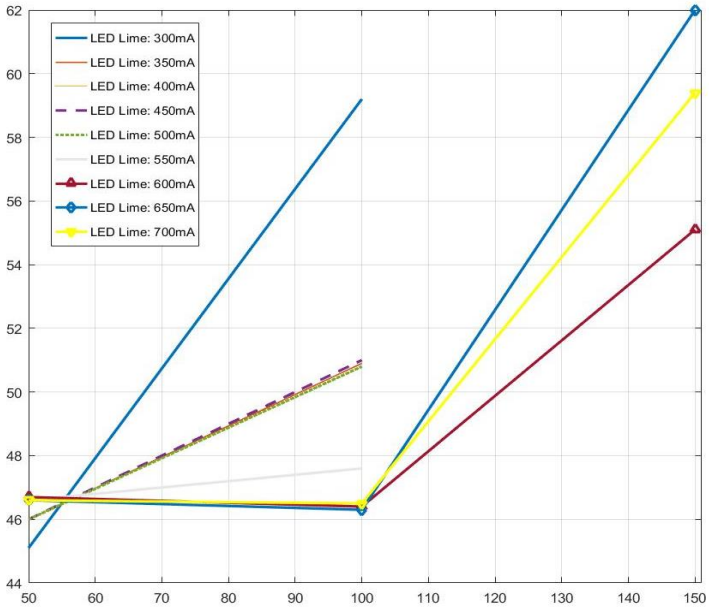
Rancang bangun LED biru dan jingga adalah sebagai berikut:



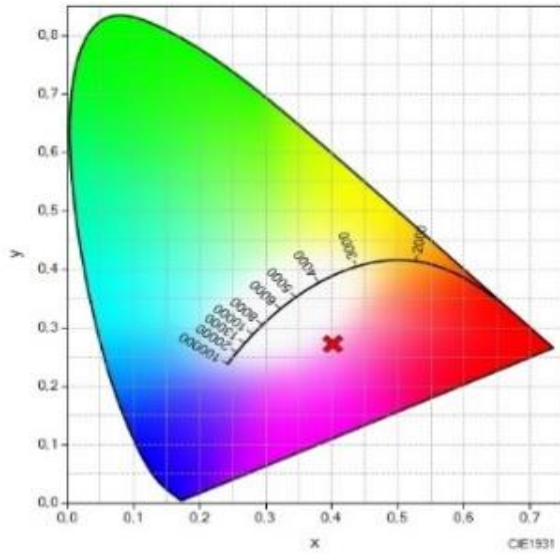
Gambar 4.11 LED Biru & Jingga Fosfor



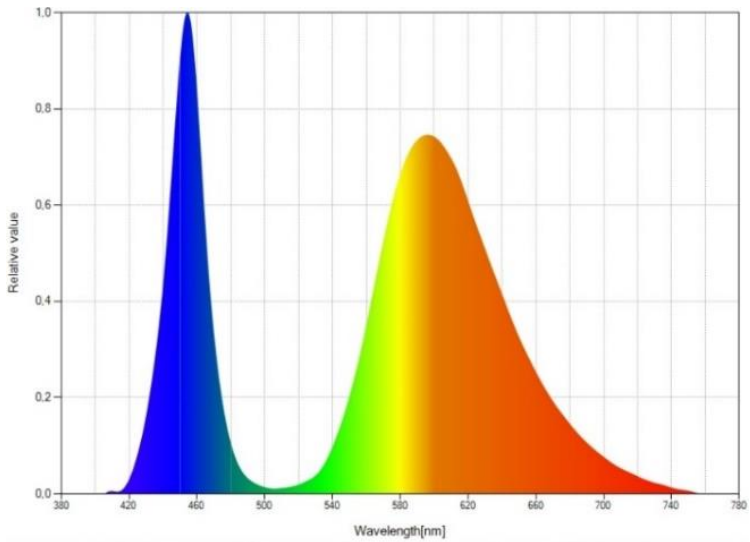
Gambar 4.12 CRI LED Biru & Jingga Fosfor



Gambar 4.13 CRI Biru-Jingga Fosfor Vs I(mA) LED Biru



Gambar 4.14 Chromaticity & CCT LED Biru & Jingga Fosfor



Gambar 4.15 Panjang Gelombang LED Biru & Jingga Fosfor

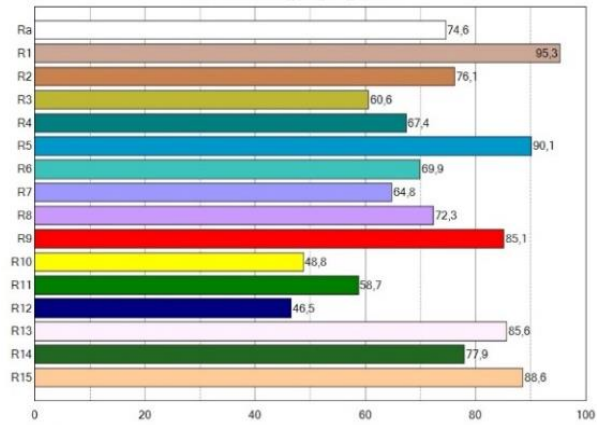
LED biru (450nm) dan jingga fosfor (596nm) dikombinasikan dan didapatkan nilai CRI 47,1, CCT 2295K, nilai *chromaticity* (0,4014;0,2725) untuk CIE 1931 (x;y) dan (0,2936;0,4486) untuk CIE 1976 (u' ; v') dengan jarak koordinat terhadap *planckian locus* Δ_{uv} sebesar -0.0581. Kombinasi dengan kedua LED ini mirip dengan kombinasi LED biru & jingga tetapi memiliki kemampuan CRI yang lebih tinggi berkat lebar profil spektrum fosfor nitrida (FWHM=84nm) yang dilapisi pada LED biru (Mach, et al., 2009). LED jingga fosfor pada gambar 4.15 memiliki puncak 596nm, sehingga komponen warna kuning (R10) dapat dipenuhi seperti pada gambar 4.7. Perbedaan lainnya adalah pada jarak koordinat dari *planckian locus* Δ_{uv} dimana pada LED biru dan jingga Δ_{uv} -0.0779 adalah dan LED biru dan jingga fosfor adalah Δ_{uv} -0.0581 seperti yang dapat dilihat pada gambar 4.8, komponen spektrum hijau dan kuning dari LED jingga fosfor membantu meningkatkan jarak Δ_{uv} . Pada gambar 4.13 dapat dilihat untuk nilai CRI tertinggi dari Biru & Jingga Fosfor didapatkan 62 saat 150mA dialirkan pada LED biru dan 500mA pada LED jingga fosfor. Walaupun kombinasi ini perubahan yang signifikan dari LED biru dan jingga, CRI masih belum melewati batas yang ditentukan yaitu diatas 70.

4.14. Lime & Merah

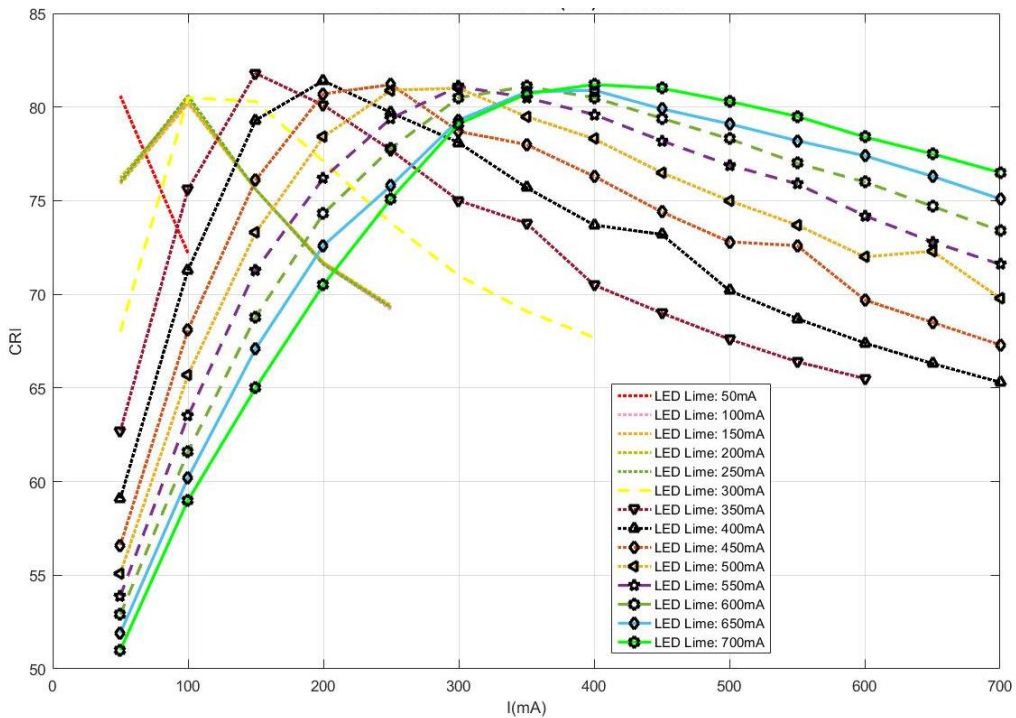
Kombinasi LED Lime & Merah menghasilkan nilai *chromaticity*, CRI, dan CCT sebagai berikut:



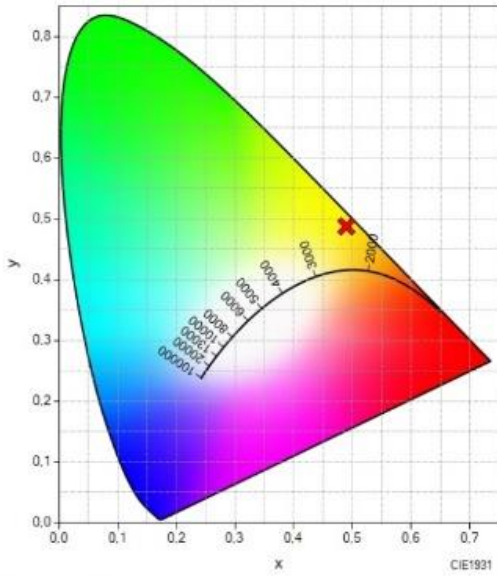
Gambar 4.16 LED Lime & Merah



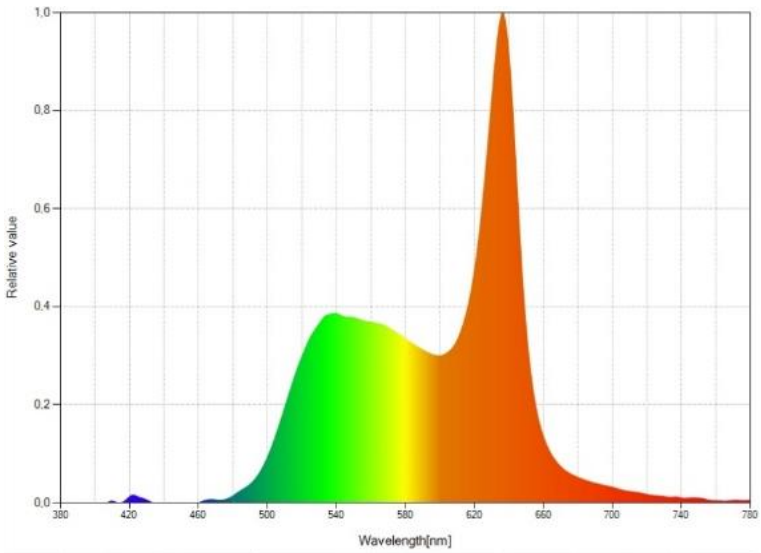
Gambar 4.17 CRI LED Lime & Merah



Gambar 4. 18 CRI LED Lime-Red Vs I(mA) LED Merah



Gambar 4.19 Chromaticity & CCT LED Lime & Merah



Gambar 4.20 Panjang Gelombang LED Lime & Merah

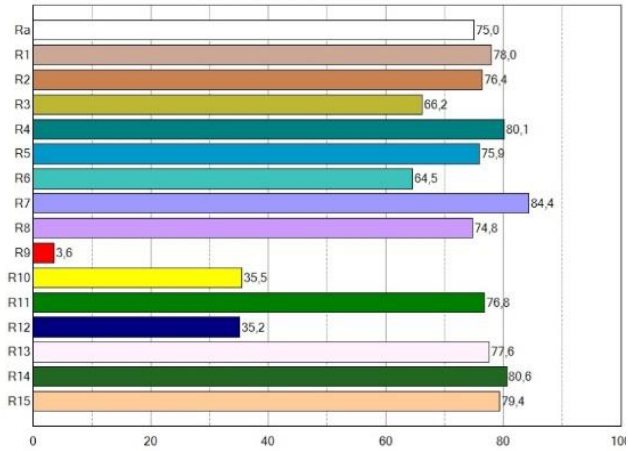
LED merah (630nm) dan lime (535nm) dikombinasikan dan didapatkan nilai CRI 74,6, CCT 2854K, dan nilai *chromaticity* (0,4894;0,4876) untuk CIE 1931 (x;y) dan (0,2486;0,5574) untuk CIE 1976 (u' ; v') dengan jarak koordinat terhadap *planckian locus* Δ_{uv} sebesar 0.0233. Kombinasi LED ini adalah kombinasi pertama yang memenuhi batas CRI yang telah ditentukan. Karena CCT kombinasi LED ini berada dibawah <5000K, standar iluminant A (lampu tungsten filament incandescent) digunakan oleh spectrometer untuk menilai CRI. Pada gambar 4.20 komponen LED utama yang mengakibatkan nilai CRI yang tinggi adalah LED Lime, LED Lime menghasilkan profil spektrum fosfor yang lebar (FWHM=109nm, pada puncak 535nm) dengan mengkonversikan hampir seluruh spektrum biru yang dihasilkan oleh bahan semikonduktor LED Lime. Pada grafik gambar 4.18 dapat diketahui CRI tertinggi didapatkan dengan nilai 81,4 untuk arus yang dialirkan 200 mA pada LED merah dan 250 mA pada LED lime. Maka telah didapatkan LED putih dikromatik dengan 2 komponen LED terpisah dengan CCT yang cenderung *warm* pada CRI diatas 70.

4.1.5 Lime & Biru

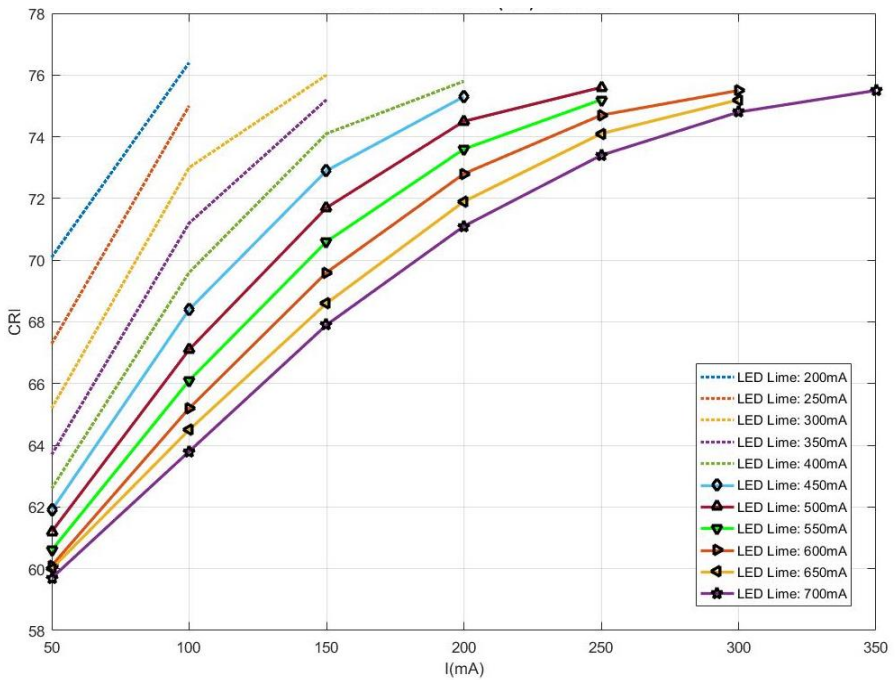
Kombinasi LED Lime & Biru menghasilkan nilai *chromaticity*, CRI, dan CCT sebagai berikut:



Gambar 4.21 LED Lime & Biru



Gambar 4.22 CRI LED Lime & Biru

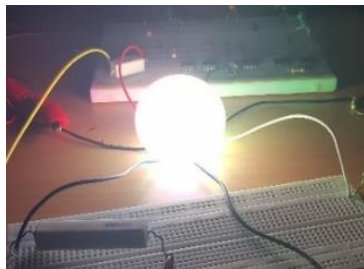


Gambar 4.23 CRI LED Lime-Blue Vs I(mA) LED Biru

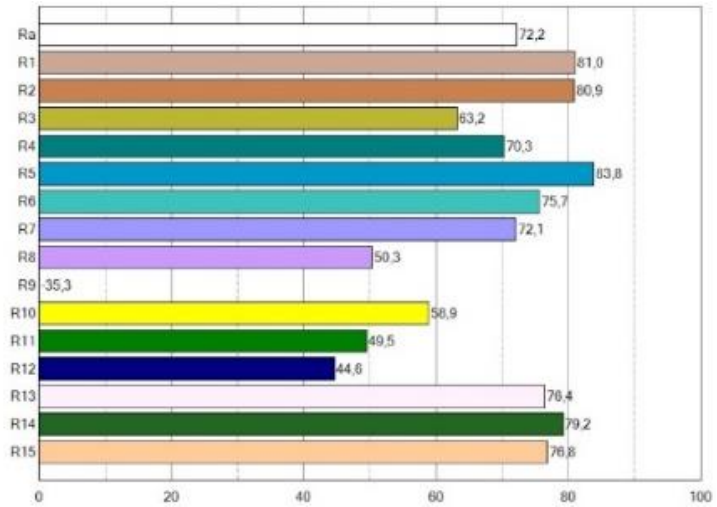
LED biru (450nm) dan lime (535nm) dikombinasikan dan didapatkan nilai CRI 75, CCT 15465K, dan nilai *chromaticity* (0,2676;0,2605) untuk CIE 1931 (x;y) dan (0,1910;0,4363) untuk CIE 1976 (u' ; v') dengan jarak koordinat terhadap *planckian locus* Δ_{uv} sebesar -0,0017. Pada gambar 4.22 dapat dilihat bahwa rancang bangun LED Lime & Biru telah memenuhi batas CRI dan memiliki CCT > 5000K maka rancangan LED mengikuti standar iluminant D yaitu daylight matahari. Pada gambar 4.25 komponen utama yang menyebabkan kombinasi LED memiliki CRI yang tinggi adalah dengan profil spektrum fosfor yang dihasilkan oleh LED Lime yang lebar (FWHM=108nm, pada puncak 535nm). Pada gambar 4.25 bentuk panjang gelombang yang dihasilkan hampir menyerupai LED Cool White Phosphor yang lebih sering digunakan untuk pencahayaan. Pada rancang bangun ini LED Biru dan LED komponen fosfor dipisahkan, sehingga dapat menjadi alternatif yang lebih baik dari LED Cool White Phosphor untuk sistem komunikasi cahaya tampak dikarenakan pada LED ini, LED biru yang dimodulasikan tidak perlu mengkonversikan sebagian energinya kepada lapisan fosfor yang juga memiliki efek keterlambatan pada komunikasi. Kombinasi LED dikromatik ini memiliki CRI diatas 70 dengan CCT yang cenderung *cool*. Kemudian dengan grafik pada gambar 4.23 didapatkan nilai CRI tertinggi dengan nilai 76,4 saat LED biru dialirkan arus sebesar 100 mA dan LED lime saat 200 mA.

4.1.6 RGB

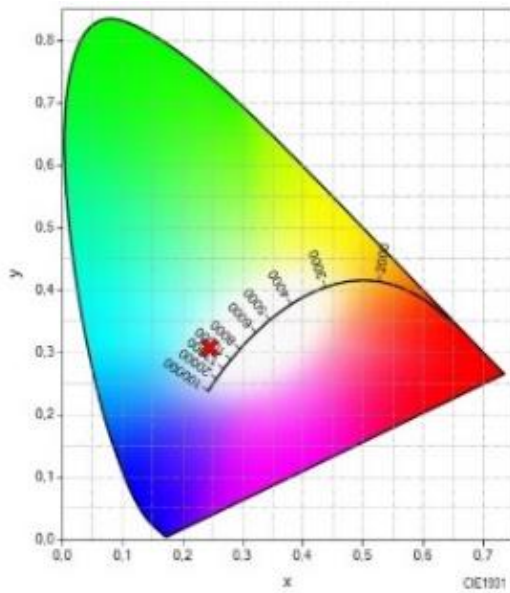
Berikut adalah nilai *chromaticity*, CRI, dan CCT dari rancang bangun RGB:



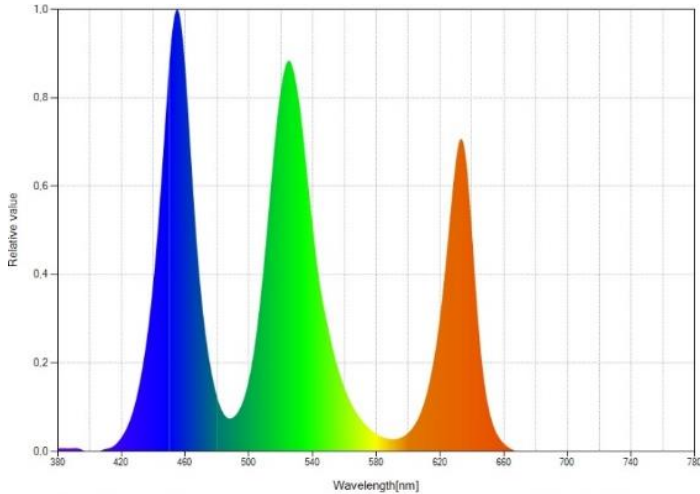
Gambar 4.26 LED RGB



Gambar 4.27 CRI LED RGB



Gambar 4.28 Chromaticity & CCT LED RGB



Gambar 4. 29 Panjang Gelombang LED RGB

LED biru (450nm), hijau (535nm), dan merah (630nm) dikombinasikan dan didapatkan nilai CRI 72,2, CCT 12286K, dan nilai *chromaticity* (0,2448;0,3079) untuk CIE 1931 (x;y) dan (0,1910;0,4363) untuk CIE 1976 (u' ; v') dengan jarak koordinat terhadap *planckian locus* Δ_{uv} sebesar 0.0316. Seperti LED Cool White Phosphor, rancang LED RGB digunakan untuk membandingkan performansi komunikasi untuk LED putih dikromatik yang dirancang dan memiliki CRI diatas 70. CRI tertinggi untuk LED RGB didapatkan pada 74,5 untuk arus 250 mA untuk LED biru, 700 mA untuk LED hijau, dan 50 mA untuk LED merah.

4.2 Karakteristik Parameter LED

Karakterisasi I-V & I-Lux LED dilakukan untuk mencari operasi bias yang diperlukan agar sinyal modulasi yang dikirimkan kepada LED tidak terdistorsi dan dapat dibaca pada penerima. Pengukuran I-V LED dilakukan dengan menggunakan multimeter dan sumber tegangan DC, beban resistor 5W. 0,5 Ω , multimeter diatur untuk pengukuran arus pada rangkaian LED kemudian dengan kenaikan sumber tegangan akan didapatkan nilai perbandingan I-V LED. Pengukuran L-Vs dilakukan untuk

mencari daerah linier dari keluaran LED, pada eksperimen ini satuan illuminansi Lux digunakan sebagai representasi keluaran sinyal optik LED dan diukur menggunakan spectrometer sekonic C-7000. LED yang telah melewati batas CRI 70 adalah LED Cool White Phosphor, LED Lime & Red, LED Lime & Biru, dan LED RGB. Pengambilan karakteristik LED dilakukan hanya untuk LED yang akan dimodulasikan yaitu LED Cool White biasa, LED Red, LED Biru, dan LED Green. Parameter-parameter dideklarasikan sebagai berikut:

$I(\text{mA})$: Arus yang melalui rangkaian LED

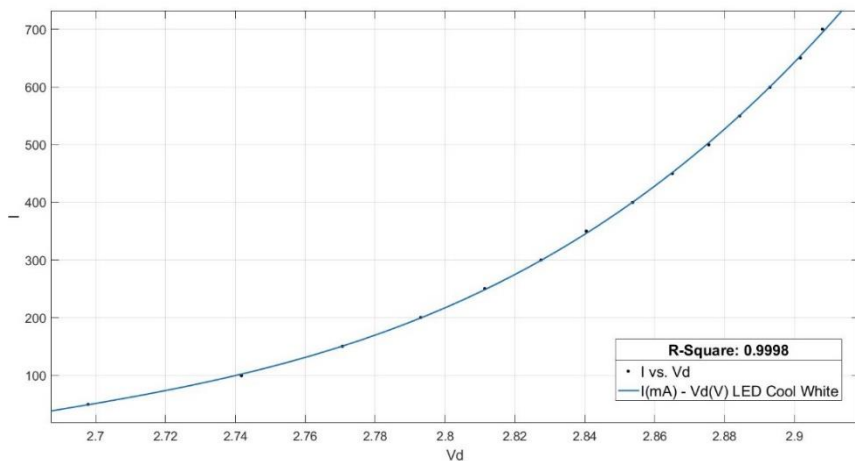
$V_d(\text{V})$: *Voltage drop* pada komponen LED

$V_s(\text{V})$: Sumber tegangan yang dikirimkan kepada rangkaian LED

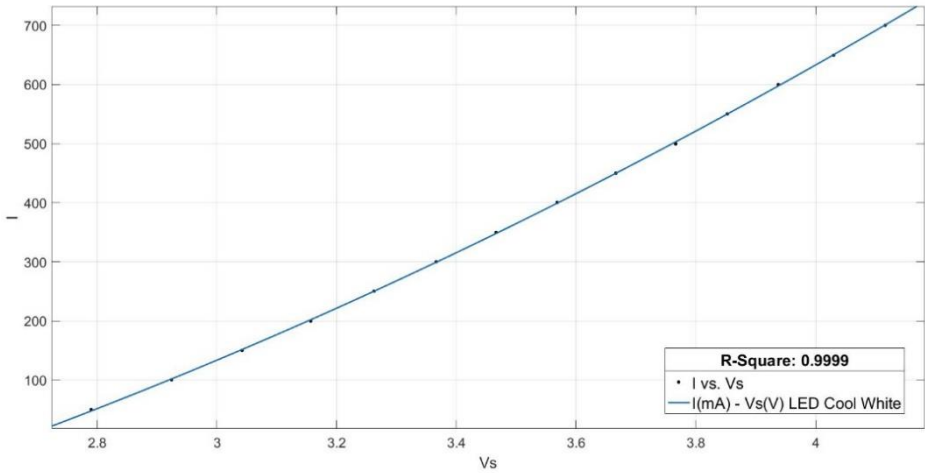
Illuminance(Lux) : Illuminansi LED

4.2.1 LED Cool White Phosphor

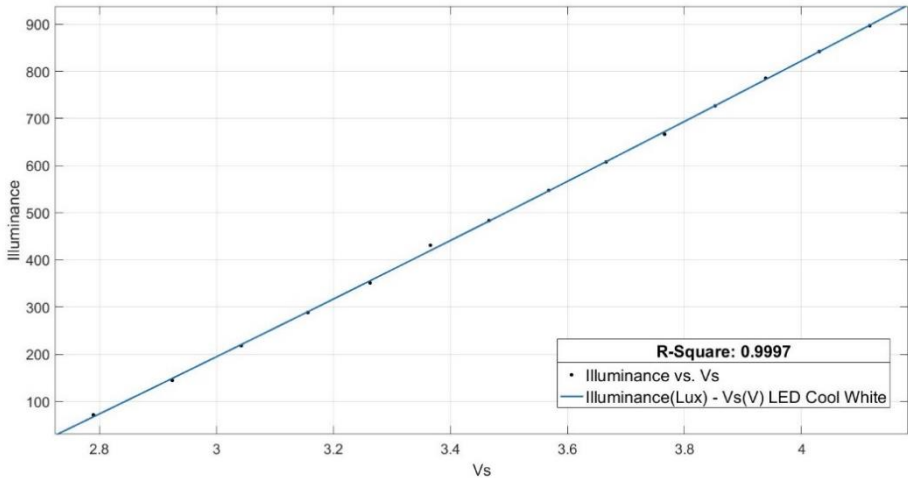
Parameter I - V_d , I - V_s , serta Lux- V_s dari LED Cool White Phosphor adalah sebagai berikut:



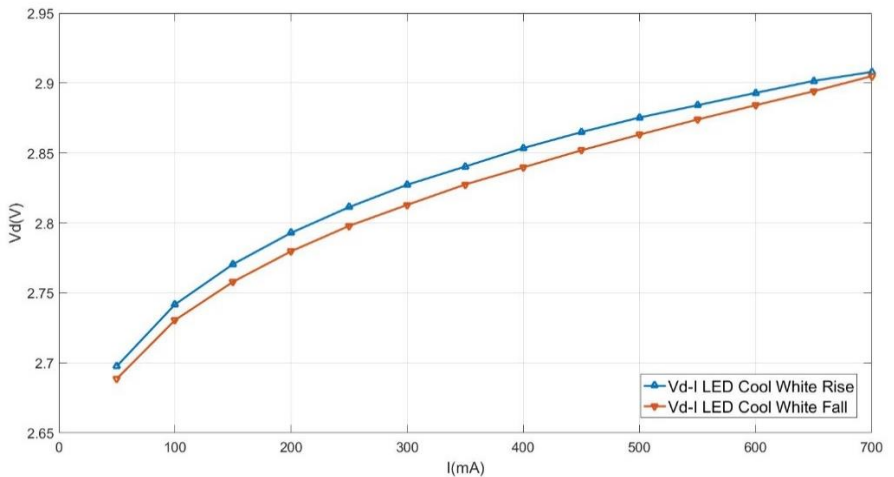
Gambar 4.30 Hubungan $I(\text{mA})$ Terhadap $V_d(\text{V})$ Pada LED Cool White



Gambar 4.31 Hubungan I (mA) Terhadap V_s (V) Pada LED Cool White



Gambar 4.32 Hubungan Illuminance(Lux) Terhadap V_s (V) LED Cool White



Gambar 4.33 Grafik Kenaikan V-I (Biru) & Penurunan V-I (Merah) Pada LED Cool White

Pada gambar 4.30 dapat dilihat bahwa hubungan arus $I(\text{mA})$ terhadap $V_d(\text{V})$ dapat dinyatakan dalam persamaan polinomial tingkat 3, $I(V_d) = 3,452 \cdot 10^4 V_d^3 + (-2,769 \cdot 10^5) V_d^2 + 7,415 \cdot 10^5 V_d + (-6,628 \cdot 10^5)$ dengan koefisien korelasi R-square: 0,9998. Seperti sifat suatu dioda hubungan arus terhadap tegangan yang dikirimkan tidak linier. Untuk mencari daerah operasi paling linier perlu diamati hubungan Lux- V_s dan I- V_s pada gambar 4.32 dan 4.31.

Hubungan Illuminance(Lux) dan $V_s(\text{V})$ pada gambar 4.32 dibentuk dengan *fitting* polinomial tingkat 3 dan didapatkan persamaan $L(V_s) = 18,62 \cdot V_d^2 + 497,3 V_d^1 + (-1465)$ dengan koefisien korelasi R-square 0,9997.

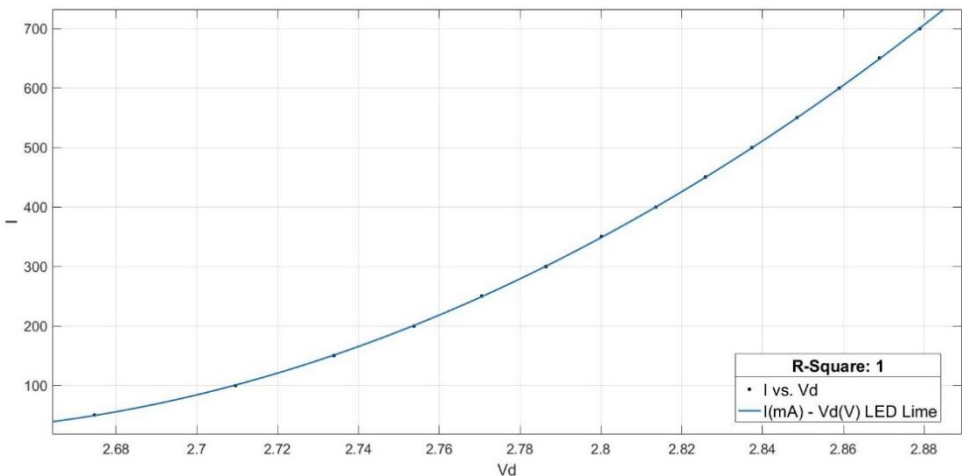
Untuk hubungan $I(\text{mA})$ dan $V_s(\text{V})$ pada gambar 4.31 dilakukan *fitting* polinomial tingkat 2 dengan persamaan $I(V_s) = 74,47 V_s^2 + (-21,73) V_s + (-471,5)$ dengan koefisien korelasi R-square 0,9999.

Pada gambar 4.17 bila dimasukkan kepada persamaan yang dibentuk untuk $L(V_s)$ untuk iluminansi Illuminance(Lux)

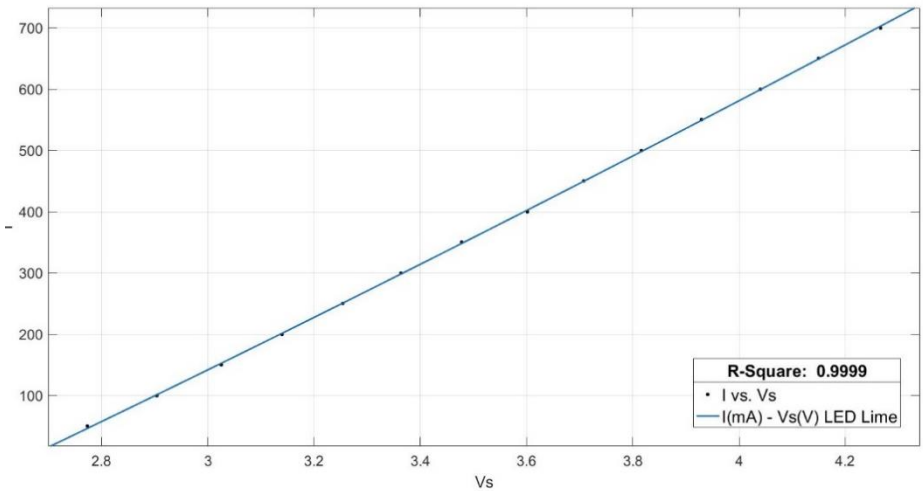
290 lux sampai 546 lux untuk mencari V_s didapatkan kenaikan nilai yang cukup linier dari $V_s(V) \approx 3,15 V$ sampai $V_s(V) \approx 3,56 V$. Setelah *range* V_s didapatkan, kemudian dicari $I(V_s)$ dan akan didapatkan nilai $I(mA) \approx 200 mA$ sampai $\approx 400 mA$. Untuk memberikan operasi bias LED maka diberikan sumber tegangan $V_s(V)$ pada titik $\approx 3,514 V$. Untuk mengukur sifat dinamis dari LED maka dihitung eror histerisis dengan data pada gambar 4.33. Error histeresis untuk LED Cool White Phosphor didapatkan sebesar 6%.

4.2.2 LED Lime

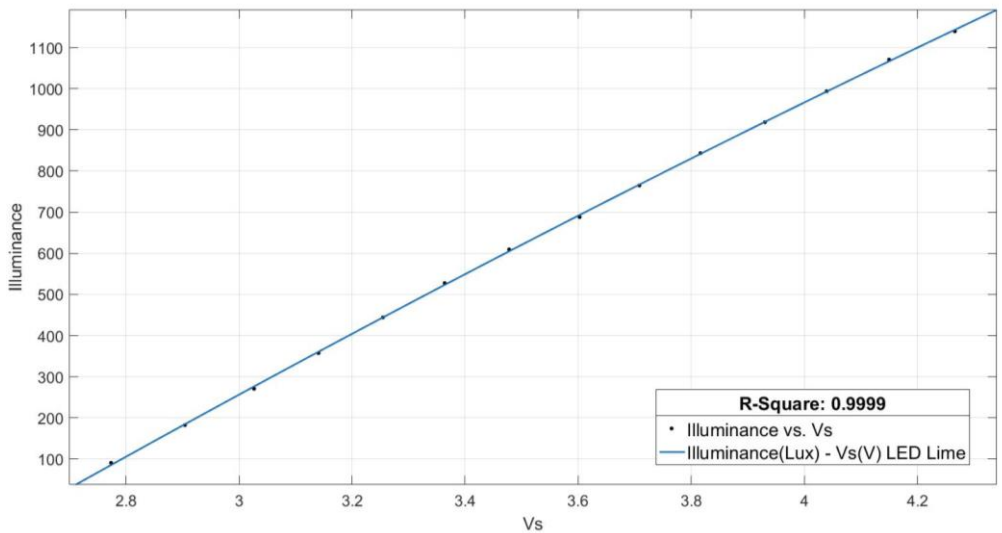
Parameter $I-V_d$, $I-V_s$, serta $Lux-V_s$ dari LED Lime adalah sebagai berikut:



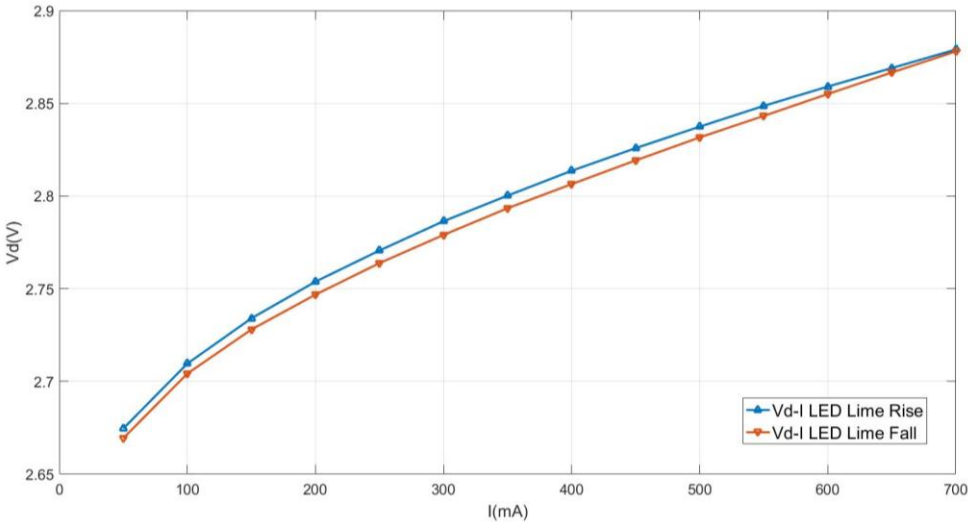
Gambar 4.34 Hubungan $I(mA)$ Terhadap $V_d(V)$ Pada LED Lime



Gambar 4.35 Hubungan $I(\text{mA})$ Terhadap $V_s(\text{V})$ Pada LED Lime



Gambar 4.36 Hubungan $\text{Illuminance}(\text{Lux})$ Terhadap $V_s(\text{V})$ Pada LED Lime



Gambar 4.37 Grafik Kenaikan V-I (Biru) & Penurunan V-I (Merah) Pada LED Lime

Pada gambar 4.34 dapat dilihat bahwa hubungan arus $I(\text{mA})$ terhadap $V_d(\text{V})$ dapat dinyatakan dalam persamaan polinomial tingkat 2, $I(V_d) = 1,018 \cdot 10^4 V_d^2 + (-5,336 \cdot 10^4) V_d + 6,993 \cdot 10^4$ dengan koefisien korelasi R-square: 1. Untuk mencari daerah operasi paling linier perlu diamati hubungan Lux- V_s dan I- V_s pada gambar 4.36 dan 4.35.

Hubungan Illuminance(Lux) dan $V_s(\text{V})$ pada gambar 4.36 dibentuk dengan *fitting* polinomial tingkat 2 dan didapatkan persamaan $L(V_s) = (-36,8 \cdot V_s^2) + 967,6 V_s + (-2315)$ dengan koefisien korelasi R-square 0,9999.

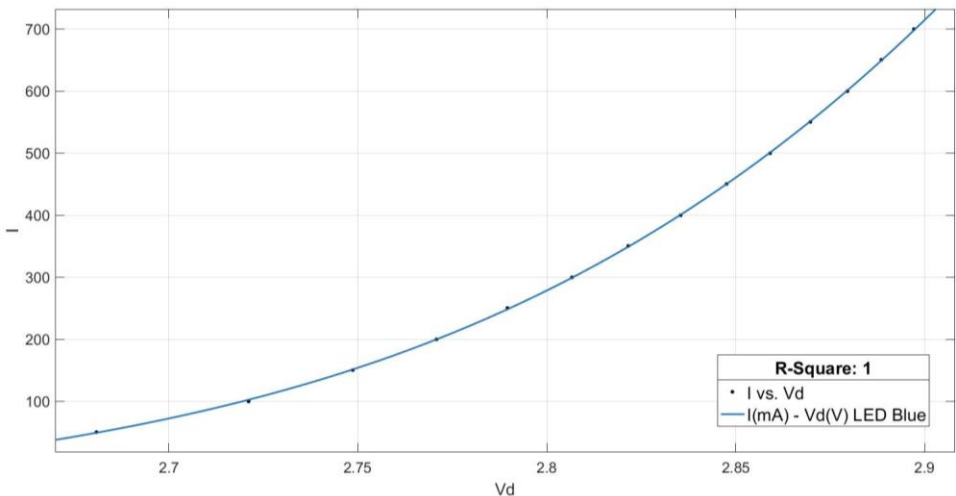
Untuk hubungan $I(\text{mA})$ dan $V_s(\text{V})$ pada gambar 4.35 dilakukan *fitting* polinomial tingkat 2 dengan persamaan $I(V_s) = 14,2 V_s^2 + (339,6) V_s + (-1005)$ dengan koefisien korelasi R-square 0,9999.

Pada gambar 4.36 bila dimasukkan kepada persamaan yang dibentuk untuk $L(V_s)$ untuk iluminansi Illuminance(Lux) 360 sampai 690 lux untuk mencari V_s didapatkan kenaikan nilai yang cukup linier dari $V_s(\text{V}) \approx 3,14 \text{ V}$ sampai $V_s(\text{V}) \approx 3,6 \text{ V}$.

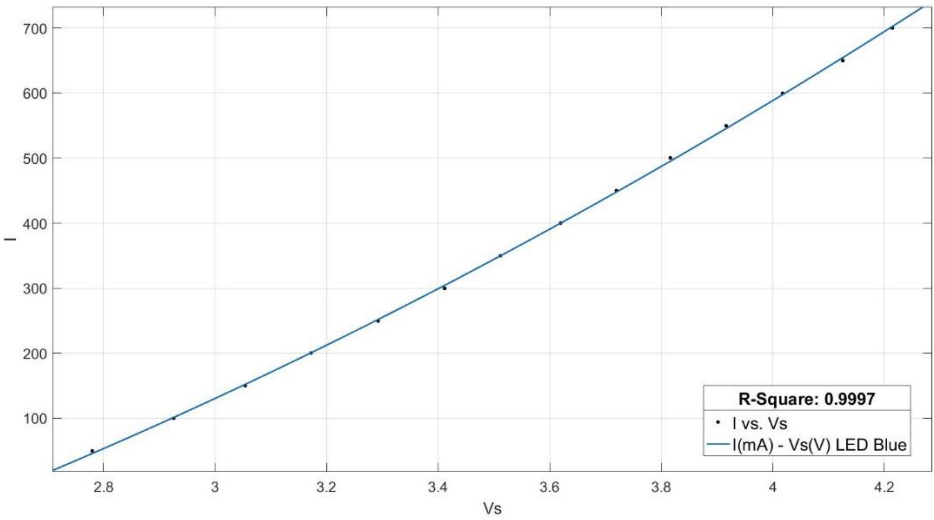
Setelah *range* V_s didapatkan, kemudian dicari $I(V_s)$ dan akan didapatkan nilai $I(\text{mA}) \approx 200 \text{ mA}$ sampai $\approx 400 \text{ mA}$. Untuk memberikan operasi bias LED maka diberikan sumber tegangan $V_s(\text{V})$ pada titik $\approx 3,37 \text{ V}$. Untuk mengukur sifat dinamis dari LED maka dihitung eror histerisis dengan data pada gambar 4.37. Eror histeresis untuk LED Cool White Phosphor didapatkan sebesar 3,4%.

4.2.3 LED Biru

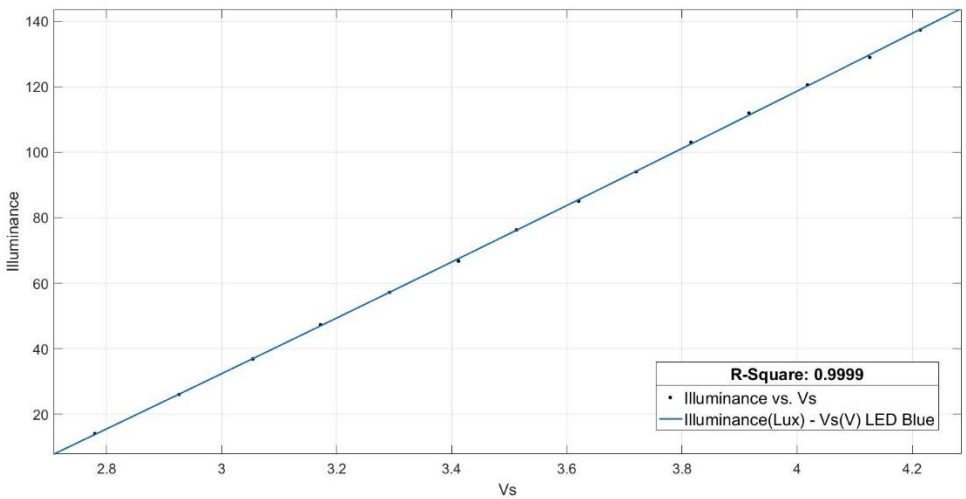
Parameter $I-V_d$, $I-V_s$, serta $\text{Lux}-V_s$ dari LED Biru adalah sebagai berikut:



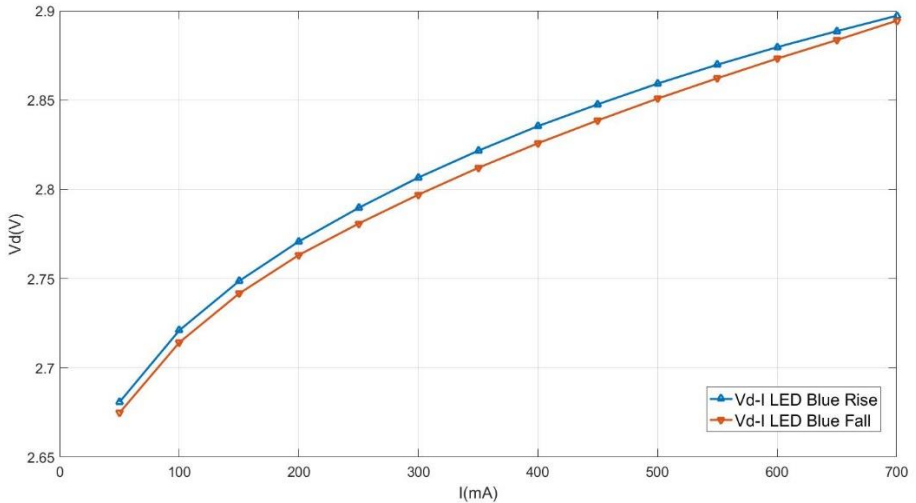
Gambar 4.38 Hubungan $I(\text{mA})$ Terhadap $V_d(\text{V})$ Pada LED Biru



Gambar 4.39 Hubungan I (mA) Terhadap V_s (V) Pada LED Biru



Gambar 4.40 Hubungan Illuminance(Lux) Terhadap V_s (V) LED Biru



Gambar 4.41 Grafik Kenaikan Vd-I (Biru) & Penurunan Vd-I (Merah) Pada LED Biru

Pada gambar 4.38 dapat dilihat bahwa hubungan arus $I(\text{mA})$ terhadap $V_d(\text{V})$ dapat dinyatakan dalam persamaan polinomial tingkat 3, $I(V_d) = 1,946 \cdot 10^4 V_d^3 + (-1,52 \cdot 10^5) V_d^2 + 3,964 \cdot 10^5 V_d + (-3,452 \cdot 10^5)$ dengan koefisien korelasi R-square: 1.

Untuk mencari daerah operasi linier perlu diamati hubungan Lux-Vs dan I-Vs pada gambar 4.40 dan 4.39. Hubungan Illuminance(Lux) dan Vs(V) pada gambar 4.40 dibentuk dengan persamaan polinomial tingkat 2 dan didapatkan persamaan $L(V_s) = 1,6 V_s^2 + 75,1 V_s + (-207,4)$ dengan koefisien korelasi R-square 0,9999.

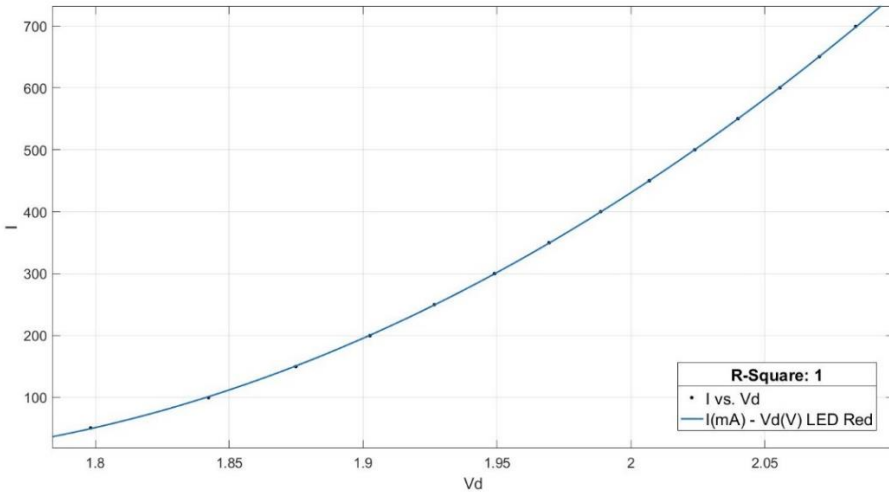
Untuk hubungan $I(\text{mA})$ dan Vs(V) pada gambar 4.39 dilakukan *fitting* polinomial tingkat 2 dengan persamaan $I(V_s) = 60,37 V_s^2 + (35,47) V_s + (-519,3)$ dengan koefisien korelasi R-square 0,9997.

Range Vs operasional didapatkan $\approx 2,92 \text{ V}$ sampai $\approx 3,41 \text{ V}$, kemudian dicari $I(V_s)$ dan akan didapatkan nilai $I(\text{mA}) \approx 100 \text{ mA}$ sampai $\approx 300 \text{ mA}$. Untuk memberikan operasi bias

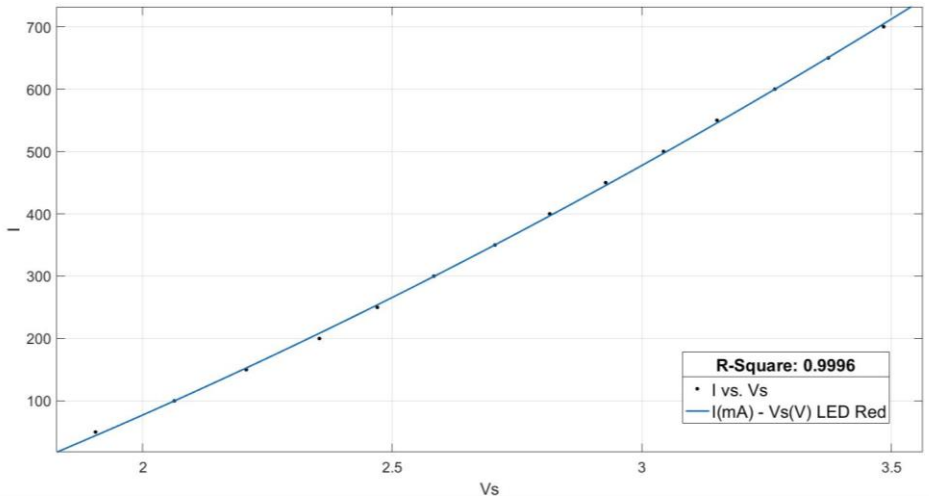
LED maka diberikan sumber tegangan $V_s(V)$ pada titik $\approx 3,6 V$. Untuk mengukur sifat dinamis dari LED maka dihitung eror histerisis dengan data pada gambar 4.41. Error histeresis untuk LED biru didapatkan sebesar 4,3%.

4.2.4 LED Red

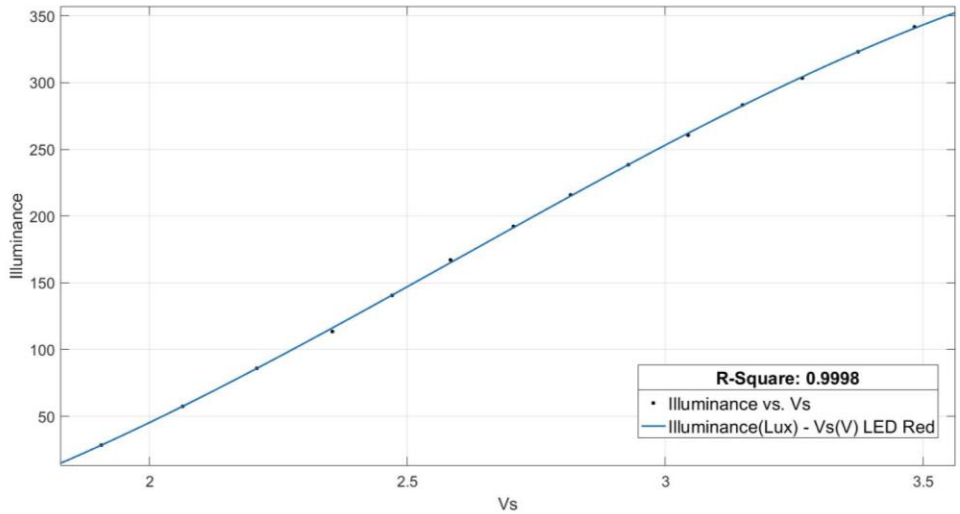
Parameter I-Vd, I-Vs, serta Lux-Vs dari LED Red adalah sebagai berikut:



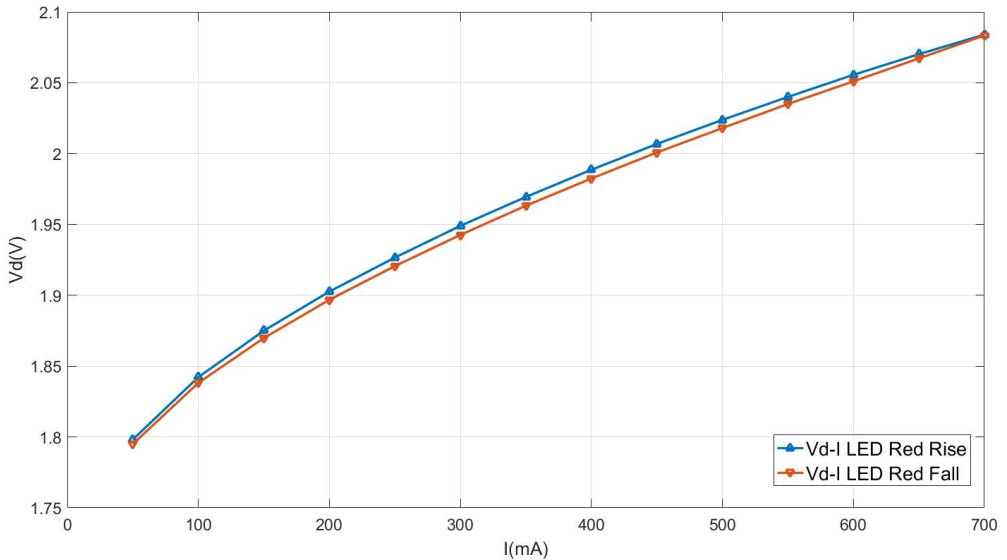
Gambar 4.42 Hubungan I(mA) Terhadap Vd(V) Pada LED Merah



Gambar 4.43 Hubungan $I(\text{mA})$ Terhadap $V_s(\text{V})$ Pada LED Merah



Gambar 4.44 Hubungan Illuminance(Lux) Terhadap $V_s(\text{V})$ LED Merah



Gambar 4.45 Grafik Kenaikan Vd-I (Biru) & Penurunan Vd-I (Merah) Pada LED Merah

Pada gambar 4.42 dapat dilihat bahwa hubungan arus I (mA) terhadap V_d (V) dapat dinyatakan dalam persamaan polinomial tingkat 2, $I(V_d) = 4545 V_d^2 + (-1.537 \cdot 10^4) V_d + 1,299 \cdot 10^4$ dengan koefisien korelasi R-square: 1.

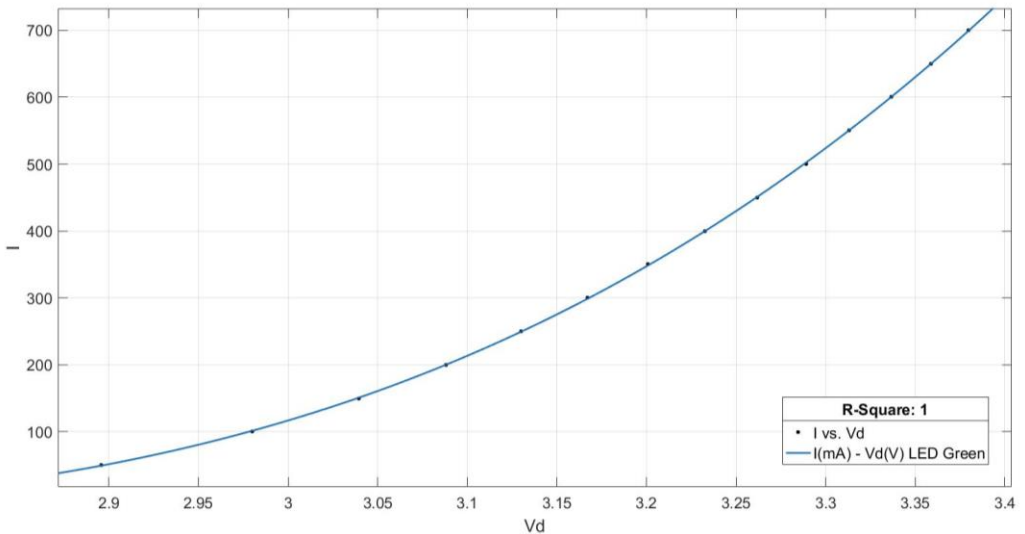
Untuk mencari daerah operasi linier perlu diamati hubungan Lux- V_s dan I- V_s pada gambar 4.44 dan 4.43. Hubungan Illuminance(Lux) dan V_s (V) pada gambar 4.44 dibentuk dengan persamaan polinomial tingkat 3 dan didapatkan persamaan $L(V_s) = -26,8 V_s^3 + 209,4 V_s^2 + (-329,9) V_s + 81,92$ dengan koefisien korelasi R-square 0,9998.

Untuk hubungan I(mA) dan V_s (V) pada gambar 4.43 dibentuk persamaan polinomial tingkat 2 dengan persamaan $I(V_s) = 46.27 V_s^2 + 169.3 V_s + (-446.6)$ dengan koefisien korelasi R-square 0,9996.

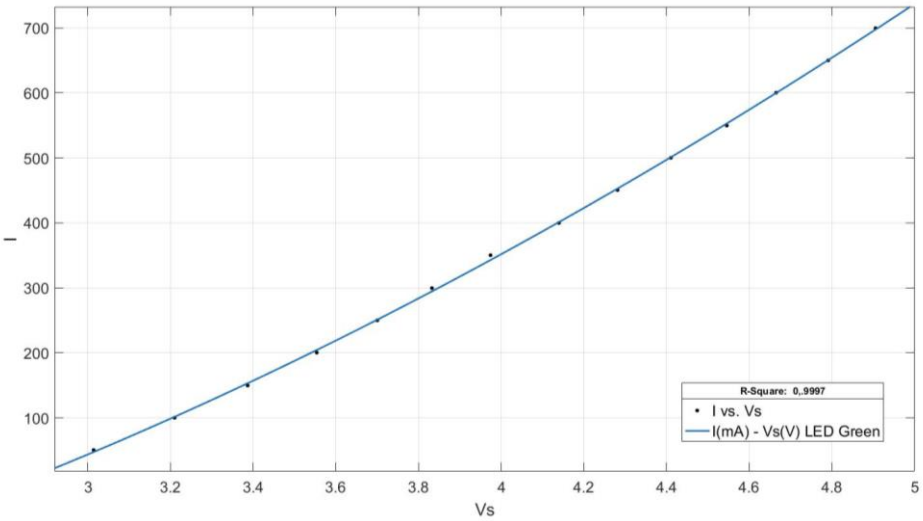
Range V_s operasional didapatkan $\approx 2,35 V$ sampai $\approx 2,58 V$, kemudian dicari $I(V_s)$ dan akan didapatkan nilai $I(mA) \approx 200 mA$ sampai $\approx 300 mA$. Untuk mengukur sifat dinamis dari LED maka dihitung eror histerisis dengan data pada gambar 4.45. Eror histeresis untuk LED merah didapatkan sebesar 2,1%.

4.2.5 LED Green

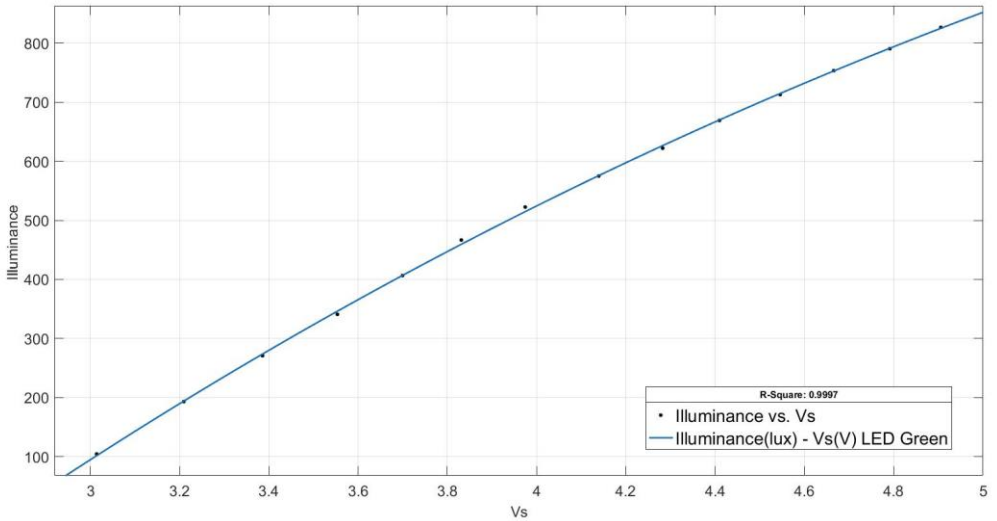
Parameter I-V serta Lux-I dari LED hijau adalah sebagai berikut:



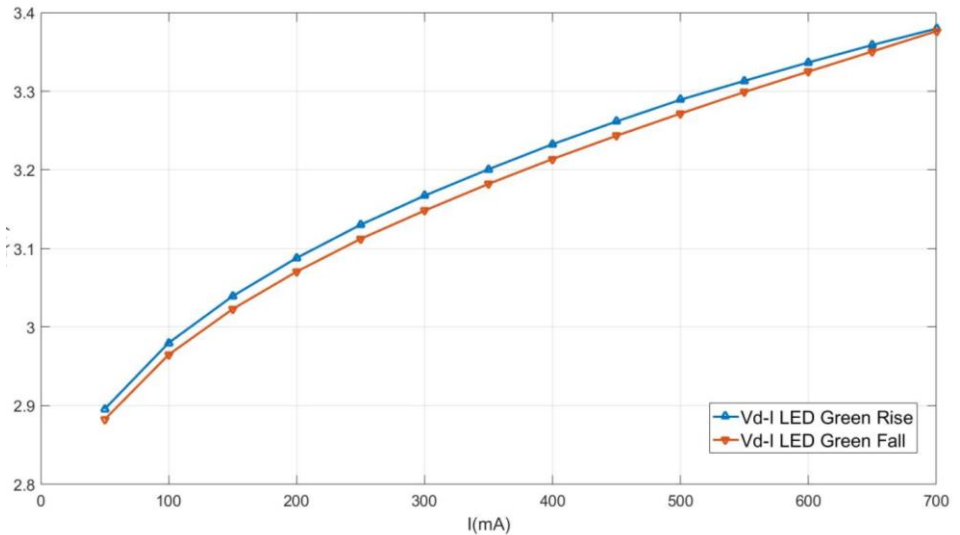
Gambar 4.46 Hubungan $I(mA)$ Terhadap $V_d(V)$ Pada LED Hijau



Gambar 4.47 Hubungan I (mA) Terhadap V_s (V) Pada LED Hijau



Gambar 4.48 Hubungan Illuminance(Lux) Terhadap V_s (V) LED Hijau



Gambar 4.49 Grafik Kenaikan Vd-I (Biru) & Penurunan Vd-I (Merah) Pada LED Hijau

Pada gambar 4.46 dapat dilihat bahwa hubungan arus $I(\text{mA})$ terhadap $V_d(\text{V})$ dapat dinyatakan dalam persamaan polinomial tingkat 3, $I(V_d) = 957.3 V_s^3 + (-7048) V_s^2 + 1,724 \cdot 10^4 V_s + (-1,402 \cdot 10^4)$ dengan koefisien korelasi R-square: 1.

Untuk mencari daerah operasi linier perlu diamati hubungan Lux-Vs dan I-Vs pada gambar 4.48 dan 4.47. Hubungan Illuminance(Lux) dan Vs(V) pada gambar 4.48 dibentuk dengan persamaan polinomial tingkat 2 dan didapatkan persamaan $L(V_s) = (-51,21 V_s^2) + 787,3 V_s + 1805$ dengan koefisien korelasi R-square 0,9997.

Untuk hubungan $I(\text{mA})$ dan Vs(V) pada gambar 4.29 dibentuk persamaan polinomial tingkat 2 dengan persamaan $I(V_s) = 38,66 V_s^2 + 37,86 V_s + (-418,3)$ dengan koefisien korelasi R-square 0,9996.

Range Vs operasional didapatkan $\approx 3,38 V$ sampai $\approx 3,83 V$, kemudian dicari $I(V_s)$ dan akan didapatkan nilai $I(\text{mA}) \approx 150 \text{ mA}$ sampai $\approx 300 \text{ mA}$. Untuk mengukur sifat dinamis

dari LED maka dihitung eror histerisis dengan data pada gambar 4.49. Error histeresis untuk LED merah didapatkan sebesar 3,7%.

4.3 Pengujian Rangkaian Sistem

Pengujian rangkaian sistem dilakukan dengan mengirimkan *bitsream* PN23 OOK-NRZ 1 Mbps untuk LED Cool White Phosphor.



Gambar 4.50 Pengujian Sistem Pada Pengiriman Data 1 Mbps dari BERT

Pada gambar 4.50 dapat dilihat bahwa pada pengiriman sinyal OOK-NRZ 1 Mbps didapatkan Bit Error Rate dengan nilai $< 1.10^{-9}$. Pengujian dilakukan dengan LED putih fosfor sebagai pembanding utama untuk melihat keterbatasan yang dihasilkan oleh LED fosfor yang dimodulasikan. Selanjutnya akan dilakukan perhitungan untuk laju data & BER untuk LED yang dirancang dan perbandingannya.

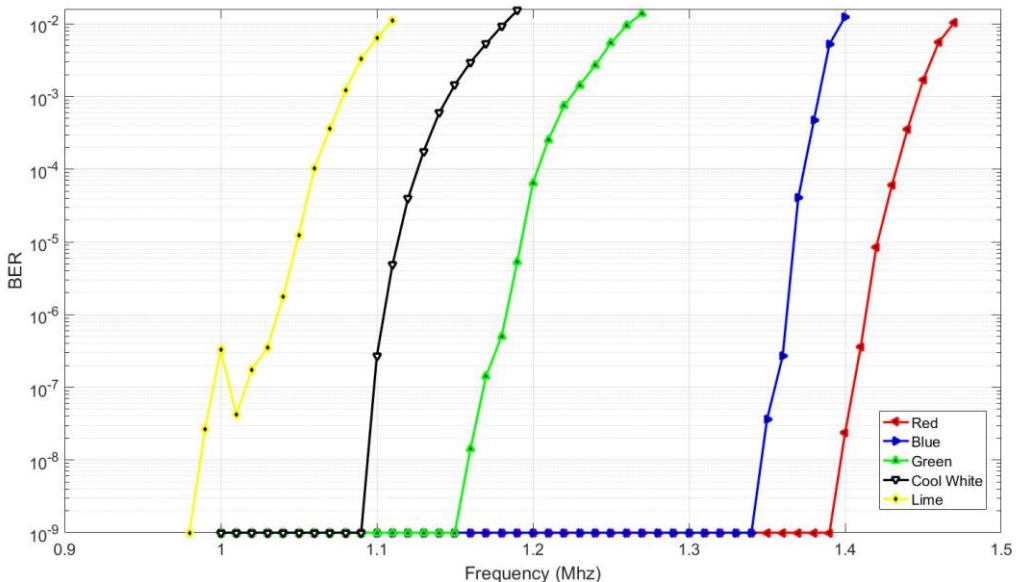
4.4 Analisa Laju Data & BER LED

Analisa laju data & BER akan dibagi menjadi beberapa bagian yaitu, analisa untuk LED tunggal (lime, putih fosfor, hijau, merah, dan biru), kemudian untuk LED kombinasi Lime-

Blue, kombinasi Lime-Red, RGB. Terakhir akan dianalisa nilai yang didapatkan dari semua LED secara keseluruhan.

4.4.1 Laju Data & Bit Error Rate LED Tunggal

Sebelum mengukur laju data & BER untuk kombinasi LED, perlu dilakukan pengukuran dengan LED tunggal untuk mengamati laju data maksimum yang dapat dihasilkan tanpa adanya gangguan/*noise* dari LED lain pada kombinasi. LED tunggal yang digunakan adalah LED Cool White Phosphor, LED Lime, LED Merah, LED Hijau, dan LED Biru.



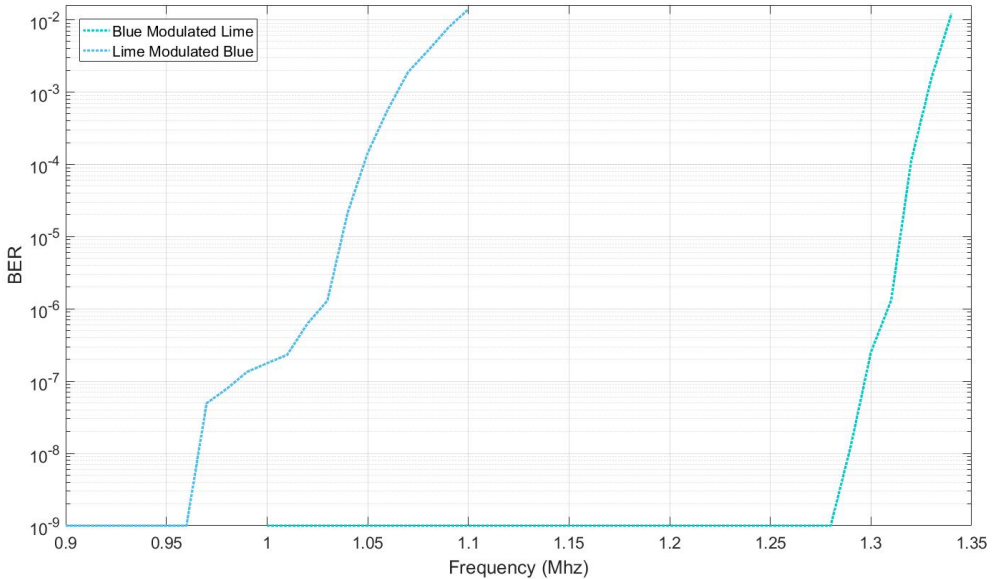
Gambar 4.51 Bit Error Rate LED Tunggal

Gambar 4.51 merupakan grafik perbandingan BER (sumbu axis y) dengan laju data pengiriman *pseudorandom bit sequence* sinyal OOK-NRZ (sumbu axis x). Laju data maksimum LED ditentukan pada titik terakhir frekuensi LED memiliki nilai BER $1 \cdot 10^{-9}$. Secara berurut LED lime memiliki laju data maksimum 0,98 Mbps; LED Cool White Phosphor 1,09 Mbps; LED Hijau

1,15 Mbps; LED Biru 1,34 Mbps; dan LED Merah 1,39 Mbps. LED Cool White Phosphor dianalisa sebagai LED tunggal karena hanya dapat diamati karakteristik komunikasi dari 1 *chip* LED yaitu “*Cool White*” pada gambar 4.51. Hal ini sesuai dengan teori bahwa LED R,G,dan B memiliki laju data yang lebih cepat dikarenakan tidak adanya profil spektrum fosfor yang ikut termodulasikan. LED Lime sendiri merupakan LED yang hanya mengemisikan profil spektrum fosfor hasil dari cahaya LED biru yang terkonversi hampir secara keseluruhan . Pada eksperimen pengambilan data gambar 4.51 arus listrik yang dialirkan untuk tiap LED adalah 300 mA untuk LED Cool White Phosphor, 122 mA untuk LED Merah, 228 mA untuk LED Hijau, 157 mA untuk LED Biru, dan 300 mA untuk LED Lime.

4.4.2 Laju Data & Bit Error Rate LED Lime-Blue

Untuk melakukan pengukuran pada kombinasi LED dikromatik 1 LED diberikan sinyal modulasi dan lainnya diberikan tegangan bias konstan. Karena kombinasi LED dilakukan untuk menghasilkan warna putih yang baik untuk pencahayaan suatu ruangan maka arus listrik dari setiap LED perlu diatur. Pada LED Lime-Blue didapatkan grafik Bit Error Rate sebagai berikut.

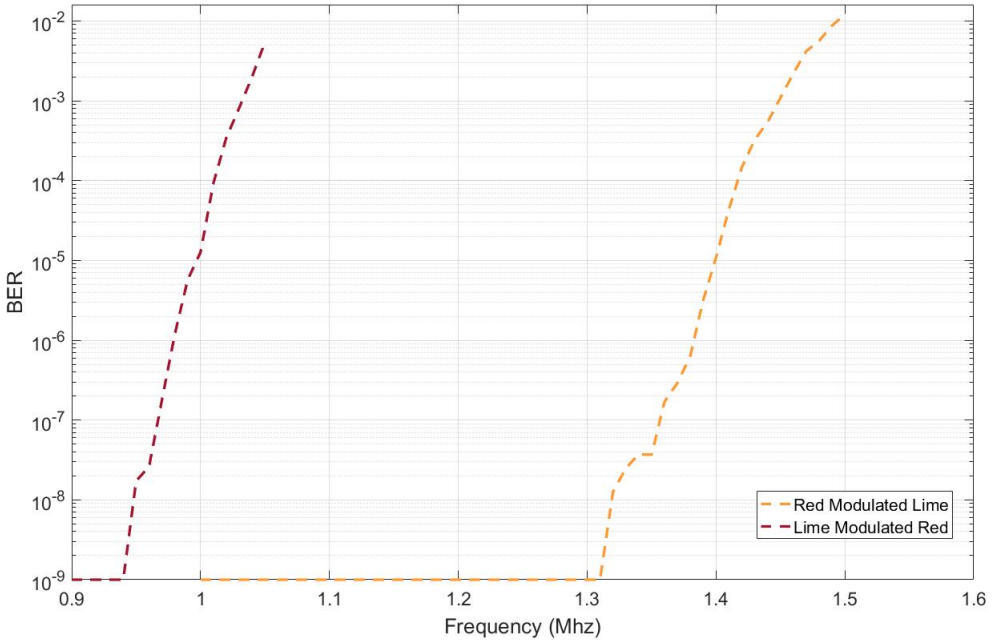


Gambar 4.52 Bit Error Rate LED Lime-Blue

Pada saat LED Lime dimodulasikan dengan arus 300 mA dan bias pada LED Biru dengan arus 110 mA didapatkan laju data maksimum 0,96 Mbps dengan nilai CRI 72 dan CCT 9354K. Sedangkan Pada saat LED Biru dimodulasikan dengan arus 157 mA dan 280 mA dengan bias pada LED Lime didapatkan laju data maksimum 1,28 Mbps dengan nilai CRI 75,2 dan CCT 19443.

4.4.3 Laju Data & Bit Error Rate LED Lime-Red

Seperti LED Lime-Blue, kombinasi LED dimodulasikan dan diberikan bias sehingga dapat menghasilkan parameter warna putih yang baik untuk suatu ruangan. Pada LED Lime-Red didapatkan grafik Bit Error Rate sebagai berikut.

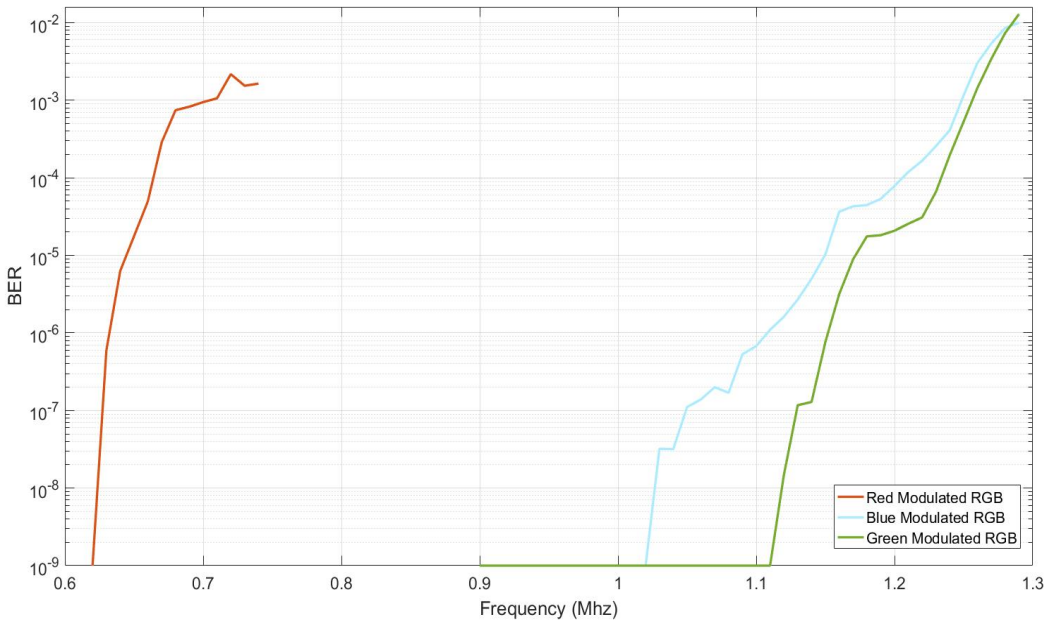


Gambar 4.53 Bit Error Rate Lime-Red

Pada saat LED Lime dimodulasikan dengan arus 300 mA dan LED Merah diberikan bias dengan arus 214 mA didapatkan laju data maksimum 0,94 Mbps dengan CRI 73,1 dan CCT 3069K. Sedangkan saat LED Merah dimodulasikan dengan arus 214 mA dan LED Lime dengan arus 166 mA didapatkan laju data maksimum 1,31 Mbps dengan CRI 70,9 dan CCT 1847K.

4.4.4 Laju Data & Bit Error Rate LED RGB

Pada sistem ini 1 LED dimodulasikan sedangkan 2 LED lainnya diberikan bias untuk menghasilkan parameter warna putih yang baik untuk penerangan suatu ruangan. Grafik Bit Error Rate dari LED RGB adalah sebagai berikut:

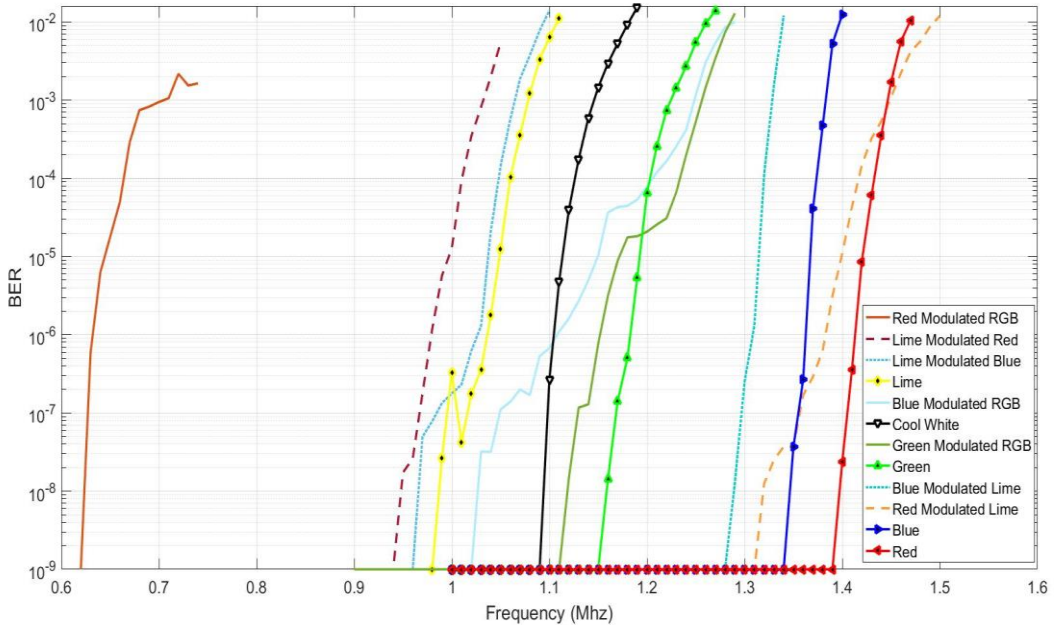


Gambar 4.54 Bit Error Rate RGB

Pertama LED Hijau dimodulasikan dengan arus 170 mA, dengan bias pada LED Merah 100 mA dan LED Biru 50 mA. Melalui kombinasi tersebut didapatkan laju data maksimum pada 1,11 Mbps dengan nilai CRI 72,4 dan CCT 11347. Selanjutnya LED Biru dimodulasikan dengan arus 130 mA, dengan LED Merah diberikan arus 50 mA dan LED Hijau 110 mA, pada kombinasi ini tidak didapatkan nilai CRI ataupun CCT dikarenakan saturasi warna oleh LED Biru tetapi kombinasi memiliki laju data maksimum pada 1,02 Mbps. Terakhir dengan kombinasi dimana LED Merah dimodulasikan pada 173 mA, LED Biru pada 50 mA, dan LED Hijau pada 100 mA, didapatkan laju data maksimum 0,62 Mbps dengan CRI 70,4 dan CCT 6947K.

4.4.5 Laju Data & Bit Error Rate Seluruh LED

Didapatkan grafik BER dan laju data dari seluruh LED dan kombinasi yang digunakan sebagai berikut:



Gambar 4.55 Bit Error Rate Seluruh LED

Laju data maksimum dari seluruh LED dapat diurutkan dari paling rendah sampai dengan tinggi sebagai berikut:

- Red Modulated RGB : 0,62 Mbps
- Lime Modulated Red : 0,94 Mbps
- Lime Modulated Blue : 0,96 Mbps
- Lime : 0,98 Mbps
- Blue Modulated RGB : 1,02 Mbps
- Cool White Phosphor : 1,09 Mbps
- Green Modulated RGB : 1,11 Mbps
- Green : 1,15 Mbps
- Blue Modulated Lime : 1,28 Mbps
- Red Modulated Lime : 1,31 Mbps

- Biru : 1,34 Mbps
- Red : 1,39 Mbps

Pada gambar 4.55 dapat dilihat perbandingan BER dengan laju data (Mbps) untuk LED tunggal (lime, putih fosfor, hijau, biru, dan merah), LED Lime-Blue, LED Lime-Red, dan RGB. Terlihat bahwa sistem LED Dikromatis Lime-Blue dan Lime-Red dapat melewati keterbatasan bandwidth oleh komponen fosfor LED Cool White, selain itu LED Lime-Blue dan Lime-Red juga memiliki kelebihan dimana parameter warna pencahayaan yang lebih mudah diatur untuk mendapatkan CRI yang tinggi seperti dengan gambar 4.18 dan 4.23 karena memanfaatkan komponen pencahayaan fosfor dari LED Lime yang tidak membatasi bandwidth sistem. Tetapi pada sistem LED dengan kombinasi 2 LED atau penurunan laju data yang diakibatkan oleh *noise* dari LED yang dibiarkan masih dimiliki, dapat diamati pada gambar 4.55 bahwa Red Modulated Lime tidak bisa sepenuhnya mencapai bandwidth dari LED Red untuk sistem ini. Kombinasi menggunakan 2 LED untuk VLC juga memiliki kelebihan yaitu tidak mengalami degradasi sinyal yang signifikan seperti pada sistem RGB, dimana 2 LED dengan profil spektrum yang berbeda mempengaruhi proses transmisi data sebagai sinyal *noise* yang diterima oleh fotodioda.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Beberapa hal yang dapat disimpulkan dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Telah didapatkan nilai CRI, CCT, dan *Chromaticity* dari kombinasi LED Dikromatik Blue-Amber, Blue-PCA, Lime-Blue, dan Lime-Red. Kombinasi LED dikromatik Lime-Red memiliki nilai CRI tertinggi 81,8, dan CCT 2747K, kombinasi ini baik digunakan untuk keadaan yang rileks seperti kamar tidur karena memiliki CCT hangat. Kemudian LED Dikromatik Lime-Blue memiliki nilai CRI 76,4, dan CCT 7232K, sehingga lebih sesuai bila digunakan untuk keadaan ruangan dengan CCT dingin seperti ruang perkantoran. Kedua kombinasi tersebut memenuhi kelompok renderensi pada standar SNI 03-6575-2001.
2. Kombinasi LED Dikromatik Lime-Red dan Lime-Blue memiliki BER 1.10^{-9} dengan laju data tertinggi 1,31 Mbps untuk LED dikromatis Lime-Red (Modulasi Merah) dan 1,28 Mbps untuk LED dikromatis Lime-Blue (Modulasi Biru). Secara keseluruhan untuk kombinasi LED putih didapatkan laju data terendah 0,62 Mbps (Modulasi Merah LED RGB) dan tertinggi 1,31 Mbps (Modulasi Merah LED Lime-Red).

5.2 Saran

Saran untuk tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. LED dikromatik dengan reflektor atau komponen optik tambahan dapat digunakan untuk mencapai iluminansi (lux) pencahayaan sesuai dengan standar pada jarak yang merepresentasikan tinggi ruangan.

2. LED dikromatik dengan komponen optik *color mixer* dapat digunakan untuk mencapai perpendaran warna yang baik. Salah satu cara lainnya adalah dengan mengurangi jarak antara LED seperti pada chip LED RGB yang dimana setiap warna dapat dimodulasikan secara mandiri dalam satu lensa *epoxy*.
3. Spektrometer (pengukuran LED) yang dapat mengambil data secara kontinu disarankan untuk penelitian yang mengukur data warna dari sumber cahaya.
4. Komponen elektronik & PCB khususnya untuk aplikasi RF dimanfaatkan untuk mencapai performansi laju data yang lebih tinggi seperti driver LED, dan *filter noise* rangkaian elektronik penerima.
5. Teknik modulasi SCM (*Single Carrier Modulation*) selain OOK-NRZ seperti PAM, dan PPM/VPPM dan teknik modulasi MCM (*Multi-Carrier Modulation*) seperti OFDM dapat diteliti lebih lanjut untuk pemanfaatannya pada LED dikromatik.

DAFTAR PUSTAKA

- Agrawal, G. P. (2002). *Fiber-Optic Communication System, 3rd edition*. New York: John Wiley & Sons.
- Badan Pusat Statistik Indonesia. (2018). *Statistik Telekomunikasi Indonesia 2017*. Badan Pusat Statistik Indonesia.
- Blinowski, G. J. (2017, December). The Feasibility of Launching Rogue Transmitter Attacks. *Wireless Personal Communications*, 97(4), 5325-5343. doi:10.1007/s11277-017-4781-3
- Bradley S. Gundlach, M. F. (2018, August 10). Design considerations for the enhancement of human color vision by breaking binocular redundancy. *Scientific Reports*, 8. doi:10.1038/s41598-018-30403-y
- Charles, B., Laurence, D., & William, C. (2006, October). DESIGN OF BIAS TEES FOR A PULSED-BIAS, PULSED-RF TEST SYSTEM USING ACCURATE COMPONENT MODELS. *Microwave Journal*, 49(10), 68-90.
- Elemental LED, Inc. (2015). *CORRELATED COLOR TEMPERATURE*. Diambil kembali dari <https://www.elementaled.com/correlated-color-temperature/>
- H. Le Minh et al. (2009, August 1). 100-Mb/s NRZ Visible Light Communications Using a Postequalized White LED. *IEEE Photonics Technology Letters*, 21(15), 1063-1065. doi:10.1109/LPT.2009.2022413
- Haas, H. (2018). LiFi is a paradigm-shifting 5G technology. *Reviews in Physics*, 26-31. doi:doi.org/10.1016/j.revip.2017.10.001
- Haas, H., Yin, L., Wang, Y., & Chen, C. (2016, March). What is Li-Fi. *JOURNAL OF LIGHTWAVE*

- TECHNOLOGY*, 34(6), 1533 - 1544.
doi:10.1109/JLT.2015.2510021
- Hecht, E. (2017). Optics. Dalam *Optics* (hal. 87-90). England: Pearson Education.
- Honglei Li, X. C. (2014). A 550 Mbit/s real-time visible light communication system based on phosphorescent white light LED for practical high-speed low-complexity application. *Optics Express*, 22, 27203-27213 .
- Honglei Li, X. C. (2015, April 19). AN ANALOG MODULATOR FOR 460 MB/S VISIBLE LIGHT DATA TRANSMISSION 460 MB/S VISIBLE LIGHT DATA TRANSMISSION. *IEEE Wireless Communications*, 22(2), 68 - 73. doi:10.1109/MWC.2015.7096287
- Keeping, S. (2015, June 2). *How the CIE Color Space is Used to Design Better LEDs*. Diambil kembali dari Digi Key: Article Library: <https://www.digikey.com/en/articles/techzone/2015/jun/how-the-cie-color-space-is-used-to-design-better-leds>
- Keiser, G. (2003). *Optical Communication Essentials*. New York: McGraw-Hill.
- Khan, L. U. (2017). Visible light communication: Applications, architecture, standardization and research challenges. *Digital Communications and Networks Volume 3, Issue 2*, Pages 78-88.
- Kim, E. F. (2005). Solid-state light sources getting smart. *Science*, 308 5726, 1274-1278.
- Li, C., Cui, G., M. M., Ruan, X., Zhang, Y., Ma, L., & M., K. X. (2016). Accurate method for computing correlated color temperature. *Optics Express*, 24(13), 14066-14078. doi:10.1364/OE.24.014066
- Liner Andrej, F. P. (2014). Features and range of the FSO

- by use of the OFDM and QAM modulation in different atmospheric conditions. *Proc. SPIE 9103 Wireless Sensing, Localization, and Processing. IX*. SPIE. doi:<https://doi.org/10.1117/12.2050279>
- Liu, J. M. (t.thn.). *Photonics Devices*. Cambridge University Press.
- Lumens. (2018). *The Color Rendering Index & Lighting*. Diambil kembali dari Benèl BV Web Site: <https://www.lumens.com/light-bulb-facts/color-rendering-index.html>
- Lyon, R. G. (2011). Estimating Signal-to-Noise Ratios. Dalam R. G. Lyon, *Understanding Digital Signal Processing* (3rd ed., hal. 875-878). Ann Arbor, Michigan, United States of America: Pearson Education, Inc.
- Mach, R. M., Mueller, G. O., Krames, M. R., Shchekin, O. B., Schmidt, P. J., Bechtel, H., . . . Steigelmann, O. (2009). All-nitride monochromatic amber-emitting phosphor-converted light-emitting diodes. *Physica Status Solidi RRL*, 3(7), 215-217. doi:10.1002/pssr.200903188
- Mitic, D., Lebr, A., & Markov, Z. (2012). Calculating the Required Number of Bits in the Function of Confidence Level and Error Probability Estimation. *SERBIAN JOURNAL OF ELECTRICAL ENGINEERING*, 9(3), 361-375. doi:10.2298/SJEE1203361M
- National Instrument. (2017, August 10). *Understanding Frequency Performance Specifications*. Diambil kembali dari <http://www.ni.com/white-paper/3359/en/>
- Niaz, M. T., Imdad, F., & Kim, H. S. (2017, February 20). Power Consumption Efficiency Evaluation of Multi-User Full-Duplex Visible Light

- Communication Systems for Smart Home Technologies. (P. Giovanni , Penyunt.) *Energies*, 10(2), 254. doi:10.3390/en10020254
- Razavi, B. (2019). The Transimpedance Amplifier [A Circuit for All Seasons]. *IEEE Solid-State Circuits Magazine*, 11(1), 10-97. doi:10.1109/MSSC.2018.2881860
- Rensselaer Polytechnic Institute. (2004, March). *How does the lighting industry measure color appearance?* Diambil kembali dari Lighting Research Center: Rensselaer Polytechnic Institute: <https://www.lrc.rpi.edu/programs/nlpip/lightinganswers/lightsources/measure.asp#>
- S. M. Jahangir Alam, M. R. (2011, January). Bit Error Rate Optimization in Fiber Optic Communications. *International Journal of Machine Learning and Computing*, 1(5). doi:10.7763/IJMLC.2011.V1.65
- Schnapf, J. L. (1987). Spectral sensitivity of human cone photoreceptors. *Nature*, 325(6103), 439-441. doi:10.1038/325439a0
- Suleyman, D., Mehmet, A. Z., Mehmet, E. E., Nurten, E., Ozlem, I. A., Mustafa, E. A., . . . Korkut, Y. (2015, May 17). Effects of 2.4 GHz radiofrequency radiation emitted from Wi-Fi equipment on microRNA expression in brain tissue. *International Journal of Radiation Biology*, 91(7), 555-561. doi:10.3109/09553002.2015.1028599
- The Department of Electrical Engineering and Computer Science. (t.thn.). *Op-Amp Buffer*. Dipetik May 27, 2019, dari <https://www.eecs.tufts.edu/~dsculley/tutorial/opamps/opamps5.html>
- World, R. W. (2012). *Advantages of LiFi | Disadvantages of LiFi*. (RF Wireless World) Diambil kembali dari

<http://www.rfwirelessworld.com/Terminology/Advantages-andDisadvantages-of-LiFi.html>

Y.-L. Li, J. M.-H. (2004). Performance Characteristics of White Light Sources Consisting of Multiple Light-Emitting Diodes. *Third International Conference on Solid State Lighting*.

Yannick Deshayes, a. L. (2016). State-of-the-Art of Infrared Technology. Dalam *Reliability, Robustness and Failure Mechanisms of LED Devices* (hal. 1-44). Elsevier. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-1-78548-152-9.50001-8>

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN

LAMPIRAN A.

Surat Pengambilan Data Tugas Akhir



KEMENTERIAN RISET, TEKNOLOGI, DAN PENDIDIKAN TINGGI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
 FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
 DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA
 Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111
 Telp : (031) 5947188, 599425-4 Fax : 03-5923626 FAXB : 1201
 http://www.ep.its.ac.id
 e-mail : kajur_rfisika@its.ac.id

Nomor : 15898/IT2.VI.2.3/PP.05.02/2019 25 Februari 2019
 Lampiran : Proposal
 Perihal : Pengambilan Data Tugas Akhir

Yth Direktur PTE - BPPT
 Gedung Teknologi dan Elektronika No.254 kawasan Puspitek Serpong
 Tangerang 15134

Dengan hormat,

Dalam rangka pelaksanaan penelitian Tugas Akhir Program S1 di Departemen Teknik Fisika FTI - ITS, maka bersama ini kami mengajukan permohonan kepada Bapak/Ibu, untuk berkenan memberikan bantuan kepada mahasiswa kami :

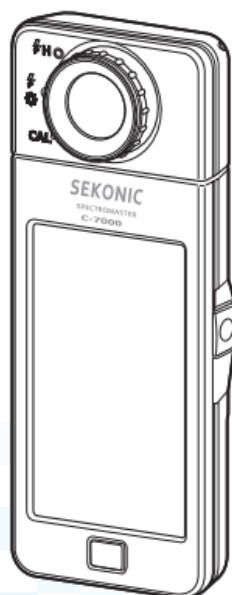
NAMA/NRP	JUDUL TUGAS AKHIR	PEMBIMBING
Anak Agung Ngurah Arymurti Santosa NRP.02311540000110	Analisa Penggunaan Sumber Cahaya Putih LED Dikromatik pada Sistem Komunikasi Cahaya Tampak OOK-NRZ	<ul style="list-style-type: none"> • Agus Muhammad Hatta, ST, M.Si, Ph.D • Dr. Sasono Rahardjo, M.Eng., B.Eng

untuk memperoleh pinjaman, pemakaian fasilitas perpustakaan, laboratorium serta pengambilan data yang akan digunakan untuk melakukan penelitian sehubungan dengan pelaksanaan Tugas Akhir yang bersangkutan.

Demikian, atas bantuan dan kerjasamanya kami sampaikan terima kasih.

Hormat kami
 Kepala Departemen,

 Agus Muhammad Hatta, ST, M.Si, Ph.D
 NIP.19780902 200312 1 002

LAMPIRAN B*Datasheet Alat Ukur dan Komponen***SEKONIC** Illuminance Spectrometer**SPECTROMASTER
C-7000**
Operating Manual

Please read the operating manual carefully to fully understand the features of this product before use and keep it for future use. Keep the operating manual in a safe place.

C-7000 Specifications

Display Items Library

Illuminance Meter Class	* Class A of JIS C 1609-1: 2006 "Illuminance meters Part 1: General measuring instruments" * DIN 5032 Part 7 Class C
Sensor	CMOS linear image sensor
Spectral Wavelength Range	380nm to 780nm
Output Wavelength Pitch	1nm (Requires the C-7000 Utility to output memorized data)
Spectral Bandwidth	Approx. 11 nm (half bandwidth)
Measuring Range	Ambient light: 1 to 200,000lx (= 0.1 to 18,600fc), 1,563 to 100,000K (more than 5lx required) Flash light: 20 to 20,500lx · s (= 1.86 to 1,900fc · s), 1,563 to 100,000K
Accuracy (Standard Illuminant A)	Illuminance: $\pm 5\% + 1$ digit (1 to 3,000lx) x,y: 0.003 (Standard Illuminant A, 800lx)
Repeatability (Standard Illuminant A)	Illuminance: 1%+1 digit (30 to 200,000lx), 5%+1 digit (1 to 29.9lx) x,y: 0.001 (500 to 200,000lx) x,y: 0.002 (100 to 499lx) x,y: 0.004 (30 to 99.9lx) x,y: 0.008 (5 to 29.9lx)
Visible-region Relative Spectral Response Characteristics (f1')	9% or less
Cosine Response (f2)	6% or less
Temperature Characteristic	Illuminance: $\pm 5\%$ of indicated value x,y: ± 0.006 (Standard Illuminant A, 1000lx)
Humidity Characteristic	Illuminance: $\pm 3\%$ of indicated value x,y: ± 0.006 (Standard Illuminant A, 1000lx)
Power Source	AA (1.5V) x 2 pcs, USB bus power
Measurement Time	Ambient: Auto - Max.: 15 sec., Min.: 0.5 sec. Ambient : Manual - 0.1s, 1sec. Flash: 1 to 1/500 sec. (in 1 step)
Measuring Modes	Text mode, Spectrum mode, Spectrum Comparison mode, CRI mode, CIE1931 (CIE1964) mode, CIE1931 (CIE1964) Comparison mode, CIE1976 mode, CIE1976 Comparison mode
Other Functions	Up to 999 memory, Preset function, Auto power off, Auto Dimmer, 2 or 10 deg. Filed of View Setting
Display languages	English, Japanese, Chinese (Simplified) - factory preset, user cannot change.
Interface	USB 2.0
Operating Temperature	-10 to 40 °C
Storage Temperature	-10 to 60 °C
Dimensions	73mm (W) x 183mm (h) x 27mm (d) = 2.9" (W) x 7.2" (h) x 1.1" (d) (excluding protruding part of light receiving) max. thickness 40mm (d) = 1.6" (d)
Weight	230g without batteries

* Features and Specifications subject to change without notice.

SEKONIC CORPORATION

7-24-14, Oizumi-Gakuen-Cho,
Nerima-Ku, Tokyo 178-8686, Japan

Product Brochure

Anritsu

MP8931A

Bit Error Rate Tester

1 kHz to 155 MHz

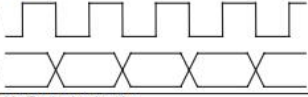
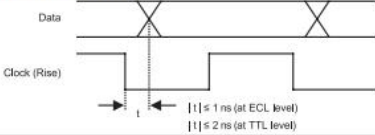
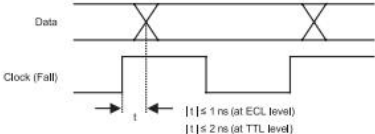


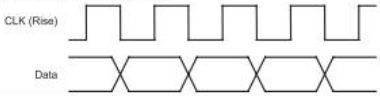
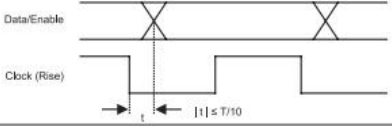
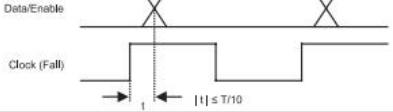
Specifications

(1) Common Items

Item	Specifications
Measurement Interface	NRZ, DVB-SPI, DVB-ASI
Remote Control Interface	GPIB, RS-232C
Internal Clock Frequency Setting	Setting range: 1 kHz to 155 MHz, Resolution: 1 Hz, Accuracy: ± 10 ppm
Transmission/Measurement Pattern	Pseudo-random code: PN9, PN9_REV, PN15, PN15_REV, PN23, PN23_REV, ALL"0", ALL"1", "1010" Synchronization establish condition: <ul style="list-style-type: none"> • NRZ: 50 bits +N bits (N: Number of stages, "0" when fixed), when normal • DVB-SPI, SVB-ASI: $8 \times (8 + N)$ bits, when normal Synchronization loss condition: when 6 error bits of 64 bits detected
Error Addition	Manual, Continuous (10^{-2} , 10^{-3} , 10^{-4} , 10^{-5} , 10^{-6} , 10^{-7})
Measurement Time/Number of Bits	Measurement time (000h00m01s00 to 999h59m59s90) Number of measurement bits (10^3 to 10^{15}) Repeat
AutoSync	On, Off
Burst	Disable, Enable
Status Indicator LED	Counting, Sync Loss, Signal Loss, Errors
Screen Display	[1] Switch between "Error rate" and "Number of errors/total count" [2] Over Flow display [3] Error display [4] Passed (elapsed) time/left (remaining) time display [5] Current/Last display
Display Screen Control	Screen display Off: None or 1, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60 min Brightness adjustment: 25, 50, 75, 100%
Auto Save of Setting Data	Saves the set parameters just before power-off and sets them automatically at the next power-on
Power Supply	Voltage: 85 to 250 V (ac) Frequency: 47.5 Hz to 63 Hz
Power Consumption	≤ 50 VA
Operating Temperature/Humidity	0° to 50°C, $\leq 80\%$ (Non condensing)
Dimensions	426 (W) \times 88 (H) \times 451 (D) mm, excluding protrusions
Mass	≤ 7 kg

(2) NRZ Interface

		Item	Specifications
Common (I/O)	Connector		BNC (75 Ω)
	Signal Type		Data/Clock
Output Signal	Common to Data/Clock	Level	<ECL> High: -0.9 ± 0.2 V, Low: -1.7 ± 0.2 V <TTL> High: $+2.5 \pm 0.3$ V, Low: 0 ± 0.3 V
		Termination Voltage Conditions	ECL: -2 V, TTL: GND
		Termination	Fixed to 75 Ω
		Polarity Switching	Data: Positive, Negative Clock: Rise, Fall
			
	Enable/Disable	Enable/Disable (fixed to Low) setting	
	Data	Bit Rate	1 kHz to 155 MHz, Resolution: 1 Hz
		Waveform	NRZ
		Tr/Tf (20 to 80%)	ECL: ≤ 1 ns, TTL: ≤ 1.5 ns
	Clock	Frequency	1 kHz to 155 MHz, Resolution: 1 Hz Accuracy: ± 10 ppm
Duty		50% $\pm 10\%$	
Tr/Tf (20 to 80%)		ECL: ≤ 1 ns, TTL: ≤ 1.5 ns	
Output Phase			
			

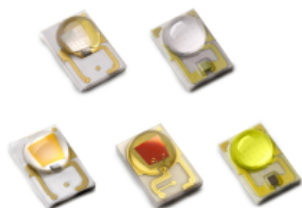
Item		Specifications	
Input Signal	Signal Type	Data/Clock/Enable	
	Common to Data/Clock Enable	Level	<ECL> High: 0 to -1.0 V, Low: -1.5 V to -2.5 V <TTL> High: +1.8 V to +5.0 V, Low: 0 to +1.0 V <Variable> Shown below
		Termination Voltage Conditions	ECL: -2 V, TTL: GND Variable: -2.5 V to +3.3 V (user-defined) Resolution: 0.1 V
		Threshold Voltage Conditions	ECL: -1.3 V, TTL: +1.4 V Variable: -2 V to +3 V (user-defined) Resolution: 0.1 V
		Termination	75 Ω/1 MΩ
		Polarity Switching	Data: Positive, Negative Clock: Rise, Fall Enable: Positive, Negative, Off 
	Data/Enable	Waveform	NRZ
		Frequency	1 kHz to 155 MHz, Accuracy: ±100 ppm
		Duty	50 ±10%
		Pulse Width	≥3 ns
	Clock	Input Phase	
			

LUXEON Rebel Color Line



High flux and efficacy on industry's most widely used color LED platform

The LUXEON Rebel Color Line has leading light output, color stability, flux density and clear saturated colors. These color LEDs are ideal for a wide variety of lighting, signaling, signage and entertainment applications. Every LUXEON Rebel Color emitter has built-in quality, reliability, lumen maintenance and the ease of manufacturing needed to create a superior, high quality light. LUXEON Rebel Color emitters give designers an endless palette of colors to work with, adding interest, dimension and liveliness to all lighting projects.



FEATURES AND BENEFITS

- Full color palette for a wider spectrum range
- Highest efficacy available for colors, allowing for lower power consumption
- High flux and leading hot and cold performance for saturated colors
- Fully developed ecosystem for LUXEON Rebel platforms

PRIMARY APPLICATIONS

- Architectural
- Lamps
- Specialty Lighting
 - Emergency Lighting
 - Entertainment

Performance Characteristics

Product Selection Guide

Table 1. Product performance of LUXEON Rebel Color Line at test conditions.

COLOR	DOMINANT ^(1,2) or PEAK WAVELENGTH ⁽²⁾ (nm)		LUMINOUS FLUX ^(1,3) (lm) or RADIOMETRIC POWER ⁽³⁾ (mW)		TEST CURRENT (mA)	PART NUMBER
	MINIMUM	MAXIMUM	MINIMUM	TYPICAL		
Far Red	720	750	210	260	350	LXML-PF01
Deep Red	650	670	270	360	350	LXM3-PD01
Red	620	645	60	62	350	LXM2-PD01-0060
	620	645	50	53	350	LXM2-PD01-0050
	620	645	40	48	350	LXM2-PD01-0040
	620	645	50	52	350	LXML-PD01-0050
	620	645	40	46	350	LXML-PD01-0040
	620	645	30	38	350	LXML-PD01-0030
	620	645	50	64	350	LXM5-PD01
Red-Orange	610	620	70	72	350	LXM2-PH01-0070
	610	620	60	67	350	LXM2-PH01-0060
	610	620	60	62	350	LXML-PH01-0060
	610	620	50	56	350	LXML-PH01-0050
	610	620	50	90	350	LXM5-PH01
PC Amber	594	604	80	110	350	LXM2-PL01-0000
Amber	585	595	60	61	350	LXML-PL01-0060
	585	595	50	54	350	LXML-PL01-0050
	585	595	40	48	350	LXML-PL01-0040
	585	595	30	38	350	LXML-PL01-0030
	585	595	50	74	350	LXM5-PL01
Lime	566	569	140	184	350	LXML-PX02-0000
Green	520	540	100	102	350	LXML-PM01-0100
	520	540	90	95	350	LXML-PM01-0090
	520	540	80	88	350	LXML-PM01-0080
	520	540	70	79	350	LXML-PM01-0070
Cyan	490	515	80	83	350	LXML-PE01-0080
	490	515	70	76	350	LXML-PE01-0070
	490	515	60	67	350	LXML-PE01-0060
Blue	460	485	40	41	350	LXML-PB01-0040
	460	485	30	35	350	LXML-PB01-0030
	460	485	23	28	350	LXML-PB01-0023
	460	485	18	22	350	LXML-PB01-0018
	460	485	50	74	700	LXML-PB02
	440	460	500	520	350	LXML-PR01-0500
Royal Blue	440	460	1100	1120	700	LXML-PR02-1100
	440	460	1050	1070	700	LXML-PR02-1050
	440	460	1000	1030	700	LXML-PR02-1000
	440	460	950	970	700	LXML-PR02-0950
	440	460	900	940	700	LXML-PR02-0900
	440	460	800	890	700	LXML-PR02-0800
	440	460	900	1030	700	LXML-PR02-A900 ⁽⁴⁾

Notes for Table 1:

- Lumileds maintains a tolerance of $\pm 0.5\text{nm}$ for dominant wavelength and $\pm 6.5\%$ on luminous flux measurements.
- Far Red, Deep Red and Royal Blue are binned by peak wavelength and all other colors by dominant wavelength.
- Far Red, Deep Red and Royal Blue are binned by radiometric power and all other colors by luminous flux.
- LXML-PR02-A900 is a selection of color bins 4 and 5 only.

Table 2. Optical characteristics for LUXEON Rebel Color Line at test conditions.

COLOR	PART NUMBER	TYPICAL SPECTRAL HALF-WIDTH ^[1] (nm)	TYPICAL TEMPERATURE COEFFICIENT OF DOMINANT or PEAK WAVELENGTH (nm/°C)	TYPICAL TOTAL INCLUDED ANGLE ^[2]	TYPICAL VIEWING ANGLE ^[3]
Far Red	LXML-PF01 ^[4]	30	0.17	145°	125°
Deep Red	LXM3-PD01 ^[4]	20	0.05	145°	125°
Red	LXM2-PD01 ^[4,6]	20	0.05	145°	125°
	LXML-PD01 ^[4,6]	20	0.05	145°	125°
	LXM5-PD01 ^[4,6]	20	0.05	145°	125°
Red-Orange	LXM2-PH01 ^[4,6]	20	0.08	145°	125°
	LXML-PH01 ^[4,6]	20	0.08	145°	125°
	LXM5-PH01 ^[4,6]	20	0.08	145°	125°
PC Amber	LXM2-PL01 ^[5]	80	-0.01	140°	120°
Amber	LXML-PL01 ^[4,6]	20	0.10	145°	125°
	LXM5-PL01 ^[4,6]	20	0.10	145°	125°
Lime	LXML-PX02 ^[5]	100	0.01	145°	125°
Green	LXML-PM01 ^[5]	30	0.05	145°	125°
Cyan	LXML-PE01 ^[5]	30	0.04	145°	125°
Blue	LXML-PB01 ^[5]	20	0.05	145°	125°
	LXML-PB02 ^[5]	20	0.05	145°	125°
Royal Blue	LXML-PR01 ^[5]	20	0.04	145°	125°
	LXML-PR02 ^[5]	20	0.04	145°	125°

Notes for Table 2:

- Spectral width at 1/2 of the peak intensity.
- Total angle at which 90% of total luminous flux is captured.
- Viewing angle is the off axis angle from the LED centerline where the luminous intensity is 1/2 of the peak value.
- Far Red, Deep Red, Red, Red-Orange and Amber products are built with aluminum indium gallium phosphide (AlInGaP).
- PC Amber, Lime, Green, Cyan, Blue and Royal Blue products are built with Indium Gallium Nitride (InGaN).
- Wavelength ranges for hot tested Red, Red-Orange and Amber have been defined to align with typical changes in spectral output at increased temperature.

Electrical and Thermal Characteristics

Table 3. Electrical and thermal characteristics for LUXEON Rebel Color Line at test conditions.

COLOR	PART NUMBER	FORWARD VOLTAGE ^[1] (V _f)			TYPICAL TEMPERATURE COEFFICIENT OF FORWARD VOLTAGE ^[2] (mV/°C)	TYPICAL THERMAL RESISTANCE—JUNCTION TO SOLDER PAD (°C/W)
		MINIMUM	TYPICAL	MAXIMUM		
Far Red	LXML-PF01	1.60	1.80	2.40	-2.0 to -4.0	5.50
Deep Red	LXM3-PD01	1.80	2.10	2.80	-2.0 to -4.0	8.00
Red	LXM2-PD01	1.80	2.10	2.80	-2.0 to -4.0	8.00
	LXML-PD01	2.31	2.90	3.51	-2.0 to -4.0	12.00
	LXM5-PD01	1.80	2.10	2.60	-2.0 to -4.0	7.00
Red-Orange	LXM2-PH01	1.80	2.10	2.80	-2.0 to -4.0	8.00
	LXML-PH01	2.31	2.90	3.51	-2.0 to -4.0	12.00
	LXM5-PH01	1.80	2.10	2.60	-2.0 to -4.0	7.00
PC Amber	LXM2-PL01	2.55	3.05	3.51	-2.0 to -4.0	10.00
Amber	LXML-PL01	2.31	2.90	3.51	-2.0 to -4.0	12.00
	LXM5-PL01	1.80	2.10	2.60	-2.0 to -4.0	7.00
Lime	LXML-PX02	2.60	2.75	3.00	-2.0 to -4.0	6.00
Green	LXML-PM01	2.55	3.21	3.51	-2.0 to -4.0	10.00
Cyan	LXML-PE01	2.55	3.17	3.51	-2.0 to -4.0	10.00
Blue	LXML-PB01	2.55	2.95	3.51	-2.0 to -4.0	10.00
	LXML-PB02	2.50	2.95	3.50	-2.0 to -4.0	6.00
Royal Blue	LXML-PR01	2.55	2.95	3.51	-2.0 to -4.0	10.00
	LXML-PR02	2.50	2.90	3.50	-2.0 to -4.0	6.00

Notes for Table 3:

- Lumileds maintains a tolerance of ±0.06V on forward voltage measurements.
- Measured between 25°C and 110°C.

Absolute Maximum Ratings

Table 4a. Absolute maximum ratings for LUXEON Rebel Color Line at $T_j=25^{\circ}\text{C}$.

PARAMETER	GREEN/CYAN/ BLUE/ROYAL BLUE	ES BLUE/ ES ROYAL BLUE	FAR RED/ DEEP RED/RED/ RED-ORANGE/AMBER	PC AMBER
DC Forward Current ^{(1),(2)}	1000mA	1000	700mA	700mA
Peak Pulsed Forward Current ^{(1),(3)}	1000mA	1200	700mA	700mA
LED Junction Temperature ⁽¹⁾ (DC & Pulse)	150°C	150°C	135°C	130°C
ESD Sensitivity (ANSI/ESDA/JEDEC JS-001-2012)	Class 3A	Class 3A	Class 3A	Class 3A
Operating Case Temperature ⁽¹⁾	-40°C to 135°C	-40°C to 135°C	-40°C to 120°C	-40°C to 110°C
LED Storage Temperature	-40°C to 135°C	-40°C to 135°C	-40°C to 135°C	-40°C to 135°C
Soldering Temperature	JEDEC 020c 260°C	JEDEC 020c 260°C	JEDEC 020c 260°C	JEDEC 020c 260°C
Allowable Reflow Cycles	3	3	3	3
Autoclave Conditions	-121°C at 2 ATM 100% Relative Humidity for 96 Hours Maximum			
Reverse Voltage (V_{reverse})	LUXEON LEDs are not designed to be driven in reverse bias			

Notes for Table 4a:

1. Proper current derating must be observed to maintain the junction temperature below the maximum.
2. Residual periodic variations due to power conversion from alternating current (AC) to direct current (DC), also called "ripple," with frequencies $\geq 100\text{Hz}$ and amplitude $\leq 15\%$ of the maximum allowable DC forward current are acceptable, assuming the average current throughout each cycle does not exceed the maximum allowable DC forward current at the corresponding maximum junction temperature.
3. Pulsed operation with a peak drive current equal to the stated peak pulsed forward current is acceptable if the pulse on-time is $\leq 5\text{ms}$ per cycle and the duty cycle is $\leq 50\%$.

Table 4b. Absolute maximum ratings for LUXEON Rebel Color Line at $T_j=85^{\circ}\text{C}$.

PARAMETER	LIME
DC Forward Current ^{(1),(2)}	1000
Peak Pulsed Forward Current ^{(1),(3)}	1200
LED Junction Temperature ⁽¹⁾ (DC & Pulse)	150°C
ESD Sensitivity (ANSI/ESDA/JEDEC JS-001-2012)	Class 3A
Operating Case Temperature ⁽¹⁾	-40°C to 135°C
LED Storage Temperature	-40°C to 135°C
Soldering Temperature	JEDEC 020c 260°C
Allowable Reflow Cycles	3
Autoclave Conditions	100% Relative Humidity for 96 Hours Maximum
Reverse Voltage (V_{reverse})	LUXEON LEDs are not designed to be driven in reverse bias

Notes for Table 4b:

1. Proper current derating must be observed to maintain the junction temperature below the maximum.
2. Residual periodic variations due to power conversion from alternating current (AC) to direct current (DC), also called "ripple," with frequencies $\geq 100\text{Hz}$ and amplitude $\leq 15\%$ of the maximum allowable DC forward current are acceptable, assuming the average current throughout each cycle does not exceed the maximum allowable DC forward current at the corresponding maximum junction temperature.
3. Pulsed operation with a peak drive current equal to the stated peak pulsed forward current is acceptable if the pulse on-time is $\leq 5\text{ms}$ per cycle and the duty cycle is $\leq 50\%$.

Characteristic Curves

Spectral Power Distribution Characteristics

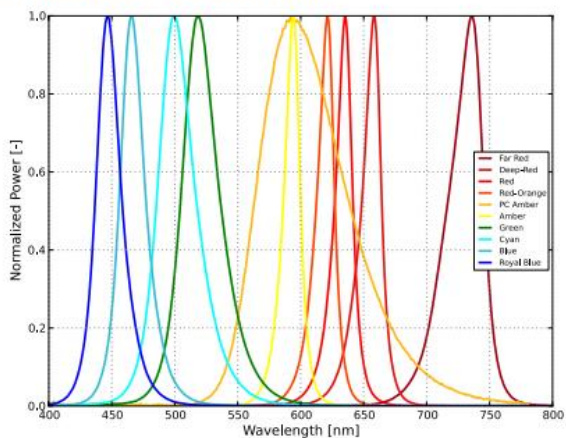


Figure 1a. Typical normalized power vs. wavelength for LUXEON Rebel Far Red, Deep Red, Red, Red-Orange, PC Amber, Amber, Green, Cyan, Blue and Royal Blue at test current, $T_j=25^{\circ}\text{C}$.

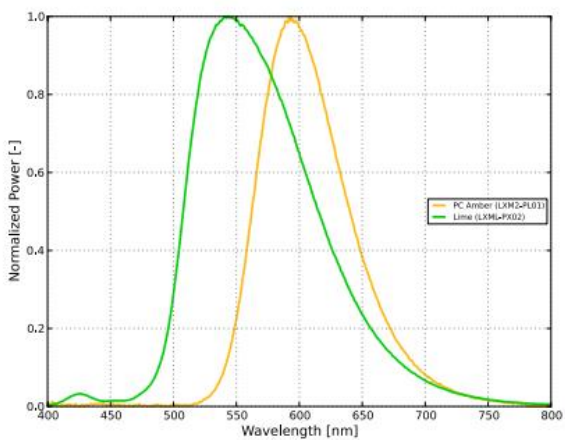


Figure 1b. Typical normalized power vs. wavelength for LUXEON Rebel PC Amber and Lime at 350mA, test temperature.

Silicon PIN Photodiode Version 1.3

SFH 213



Features:

- Wavelength range ($S_{10\%}$) 400 nm to 1100 nm
- Short switching time (typ. 5 ns)
- 5 mm LED plastic package

Applications

- High speed photointerrupters
- Industrial electronics
- For control and drive circuits

Ordering Information

Type:	Photocurrent I_p [μA] $V_R = 5 \text{ V}$, Std. Light A, $E_v = 1000 \text{ lx}$	Ordering Code
SFH 213	135 (≥ 100)	Q62702P0930

Maximum Ratings ($T_A = 25\text{ }^\circ\text{C}$)

Parameter	Symbol	Values	Unit
Operating and storage temperature range	$T_{op}; T_{stg}$	-40 ... 100	$^\circ\text{C}$
Reverse voltage	V_R	20	V
Reverse voltage ($t < 2$ min)	V_R	50	V
Total Power dissipation	P_{tot}	150	mW
ESD withstand voltage (acc. to ANSI/ESDA/JEDEC JS-001 - HBM)	V_{ESD}	2000	V

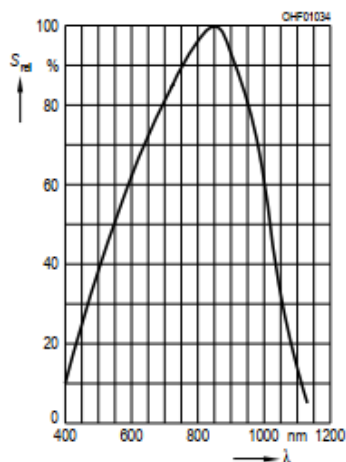
Characteristics ($T_A = 25\text{ }^\circ\text{C}$)

Parameter	Symbol	Values	Unit
Photocurrent ($E_v = 1000$ lx, Std. Light A, $V_R = 5$ V, $T = 2856$ K)	(typ (min)) I_p	135 (≥ 100)	μA
Wavelength of max. sensitivity	(typ) $\lambda_{S,max}$	850	nm
Spectral range of sensitivity	(typ) $\lambda_{10\%}$	(typ) 400 ... 1100	nm
Radiant sensitive area	(typ) A	1.00	mm^2
Dimensions of radiant sensitive area	(typ) $L \times W$	1 x 1	mm x mm
Half angle	(typ) ϕ	± 10	$^\circ$
Dark current ($V_R = 20$ V)	(typ (max)) I_R	1 (≤ 5)	nA
Spectral sensitivity of the chip ($\lambda = 870$ nm)	(typ) $S_{\lambda,typ}$	0.65	A / W
Quantum yield of the chip ($\lambda = 870$ nm)	(typ) η	0.93	Electrons / Photon
Open-circuit voltage ($E_v = 1000$ lx, Std. Light A)	(typ (min)) V_O	430 (≥ 350)	mV
Short-circuit current ($E_v = 1000$ lx, Std. Light A)	(typ) I_{sc}	125	μA
Rise and fall time ($V_R = 20$ V, $R_L = 50$ Ω , $\lambda = 850$ nm)	(typ) t_r, t_f	0.005	μs
Forward voltage ($I_F = 100$ mA, $E = 0$)	(typ) V_F	1.3	V
Capacitance ($V_R = 0$ V, $f = 1$ MHz, $E = 0$)	(typ) C_O	11	pF
Temperature coefficient of V_O	(typ) TC_V	-2.6	mV / K

Parameter		Symbol	Values	Unit
Temperature coefficient of I_{SC} (Std. Light A)	(typ)	TC_1	0.18	% / K
Noise equivalent power ($V_R = 20 \text{ V}$, $\lambda = 870 \text{ nm}$)	(typ)	NEP	0.028	$\text{pW} / \text{Hz}^{1/2}$
Detection limit ($V_R = 20 \text{ V}$, $\lambda = 870 \text{ nm}$)	(typ)	D^*	3.6×10^{12}	$\text{cm} \times \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$

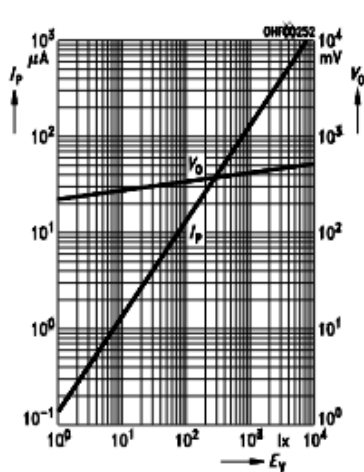
Relative Spectral Sensitivity ^{1) page 8}

$$S_{\text{rel}} = f(\lambda)$$



Photocurrent / Open-Circuit Voltage ^{1) page 8}

$$I_p (V_R = 5 \text{ V}) / V_O = f(E_V)$$

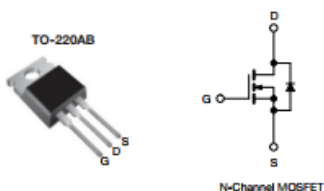



www.vishay.com
IRF510, SiHF510

Vishay Siliconix

Power MOSFET

PRODUCT SUMMARY		
V_{DS} (V)	100	
$R_{DS(on)}$ (Ω)	$V_{GS} = 10$ V	0.54
Q_g max. (nC)	8.3	
Q_{gs} (nC)	2.3	
Q_{gd} (nC)	3.8	
Configuration	Single	


FEATURES

- Dynamic dV/dt rating
- Repetitive avalanche rated
- 175 °C operating temperature
- Fast switching
- Ease of paralleling
- Simple drive requirements
- Material categorization: for definitions of compliance please see www.vishay.com/doc?99912


Note

This datasheet provides information about parts that are RoHS-compliant and / or parts that are non-RoHS-compliant. For example, parts with lead (Pb) terminations are not RoHS-compliant. Please see the information / tables in this datasheet for details.

DESCRIPTION

Third generation power MOSFETs from Vishay provide the designer with the best combination of fast switching, ruggedized device design, low on-resistance and cost-effectiveness.

The TO-220AB package is universally preferred for all commercial-industrial applications at power dissipation levels to approximately 50 W. The low thermal resistance and low package cost of the TO-220AB contribute to its wide acceptance throughout the industry.

ORDERING INFORMATION	
Package	TO-220AB
Lead (Pb)-free	IRF510PbF SiHF510-E3
SnPb	IRF510 SiHF510

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS ($T_C = 25$ °C, unless otherwise noted)				
PARAMETER		SYMBOL	LIMIT	UNIT
Drain-Source Voltage		V_{DS}	100	V
Gate-Source Voltage		V_{GS}	± 20	
Continuous Drain Current	V_{GS} at 10 V		$T_C = 25$ °C	5.6
			$T_C = 100$ °C	4.0
Pulsed Drain Current ^a		I_{DM}	20	A
Linear Derating Factor			0.29	W/°C
Single Pulse Avalanche Energy ^b		E_{AS}	75	mJ
Repetitive Avalanche Current ^a		I_{AV}	5.6	A
Repetitive Avalanche Energy ^a		E_{AR}	4.3	mJ
Maximum Power Dissipation	$T_C = 25$ °C	P_D	43	W
Peak Diode Recovery dV/dt ^c		dV/dt	5.5	V/ns
Operating Junction and Storage Temperature Range		T_J, T_{stg}	-55 to +175	°C
Soldering Recommendations (Peak temperature) ^d	for 10 s		300	
Mounting Torque	6-32 or M3 screw		10	lbf · in
			1.1	N · m

Notes

- Repetitive rating; pulse width limited by maximum junction temperature (see fig. 11).
- $V_{DS} = 25$ V, starting $T_J = 25$ °C, $L = 4.8$ mH, $R_{\theta} = 25$ Ω , $I_{AS} = 5.6$ A (see fig. 12).
- $I_{SD} \leq 5.6$ A, $dI/dt \leq 75$ A/ μ s, $V_{DD} \leq V_{DS}$, $T_J \leq 175$ °C.
- 1.6 mm from case.



THERMAL RESISTANCE RATINGS				
PARAMETER	SYMBOL	TYP.	MAX.	UNIT
Maximum Junction-to-Ambient	$R_{\theta JA}$	-	62	°C/W
Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	$R_{\theta CS}$	0.50	-	
Maximum Junction-to-Case (Drain)	$R_{\theta JC}$	-	3.5	

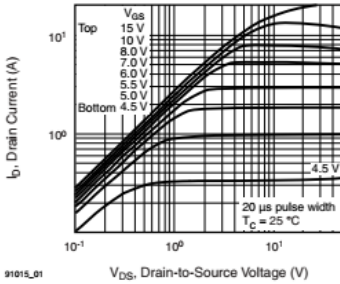
SPECIFICATIONS ($T_J = 25^\circ\text{C}$, unless otherwise noted)						
PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
Static						
Drain-Source Breakdown Voltage	V_{DS}	$V_{GS} = 0\text{ V}, I_D = 250\ \mu\text{A}$	100	-	-	V
V_{DS} Temperature Coefficient	$\Delta V_{DS}/T_J$	Reference to 25°C , $I_D = 1\ \text{mA}$	-	0.12	-	V/°C
Gate-Source Threshold Voltage	$V_{GS(th)}$	$V_{DS} = V_{GS}, I_D = 250\ \mu\text{A}$	2.0	-	4.0	V
Gate-Source Leakage	I_{GSS}	$V_{GS} = \pm 20\ \text{V}$	-	-	± 100	nA
Zero Gate Voltage Drain Current	I_{DSS}	$V_{DS} = 100\ \text{V}, V_{GS} = 0\ \text{V}$	-	-	25	μA
		$V_{DS} = 80\ \text{V}, V_{GS} = 0\ \text{V}, T_J = 150^\circ\text{C}$	-	-	250	
Drain-Source On-State Resistance	$R_{DS(on)}$	$V_{GS} = 10\ \text{V}, I_D = 3.4\ \text{A}^b$	-	-	0.54	Ω
Forward Transconductance	g_{fs}	$V_{DS} = 50\ \text{V}, I_D = 3.4\ \text{A}^b$	1.3	-	-	S
Dynamic						
Input Capacitance	C_{iss}	$V_{GS} = 0\ \text{V},$ $V_{DS} = 25\ \text{V},$ $f = 1.0\ \text{MHz},$ see fig. 5	-	180	-	pF
Output Capacitance	C_{oss}		-	81	-	
Reverse Transfer Capacitance	C_{rss}		-	15	-	
Total Gate Charge	Q_g	$V_{GS} = 10\ \text{V}$ $I_D = 5.6\ \text{A}, V_{DS} = 80\ \text{V}$ $V_{DS} = 10\ \text{V},$ see fig. 6 and fig. 13 ^b	-	-	8.3	nC
Gate-Source Charge	Q_{gs}		-	-	2.3	
Gate-Drain Charge	Q_{gd}		-	-	3.8	
Turn-On Delay Time	$t_{d(on)}$	$V_{DD} = 50\ \text{V}, I_D = 5.6\ \text{A}$ $R_g = 24\ \Omega, R_D = 8.4\ \Omega,$ see fig. 10 ^b	-	6.9	-	ns
Rise Time	t_r		-	16	-	
Turn-Off Delay Time	$t_{d(off)}$		-	15	-	
Fall Time	t_f		-	9.4	-	
Internal Drain Inductance	L_D	Between lead, 6 mm (0.25") from package and center of die contact	-	4.5	-	nH
Internal Source Inductance	L_S		-	7.5	-	
Drain-Source Body Diode Characteristics						
Continuous Source-Drain Diode Current	I_S	MOSFET symbol showing the integral reverse p - n junction diode	-	-	5.6	A
Pulsed Diode Forward Current ^a	I_{SM}		-	-	20	
Body Diode Voltage	V_{SD}	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_S = 5.6\ \text{A}, V_{GS} = 0\ \text{V}^b$	-	-	2.5	V
Body Diode Reverse Recovery Time	t_{rr}	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_S = 5.6\ \text{A}, dI/dt = 100\ \text{A}/\mu\text{s}^b$	-	100	200	ns
Body Diode Reverse Recovery Charge	Q_{rr}		-	0.44	0.88	μC
Forward Turn-On Time	t_{on}	Intrinsic turn-on time is negligible (turn-on is dominated by L_S and L_D)				

Notes

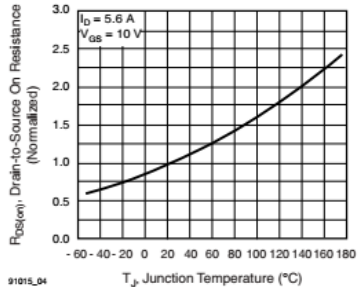
- a. Repetitive rating; pulse width limited by maximum junction temperature (see fig. 11).
b. Pulse width $\leq 300\ \mu\text{s}$; duty cycle $\leq 2\%$.



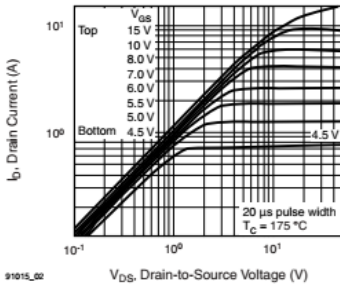
TYPICAL CHARACTERISTICS (25 °C, unless otherwise noted)



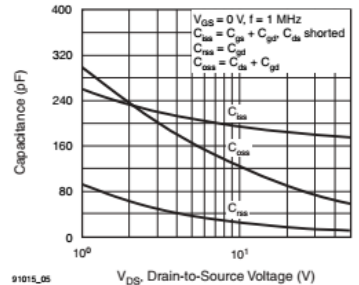
91015_01 **Fig. 1 - Typical Output Characteristics, $T_C = 25\text{ }^\circ\text{C}$**



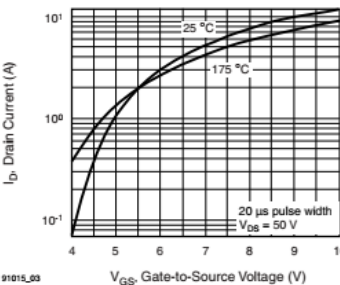
91015_04 **Fig. 4 - Normalized On-Resistance vs. Temperature**



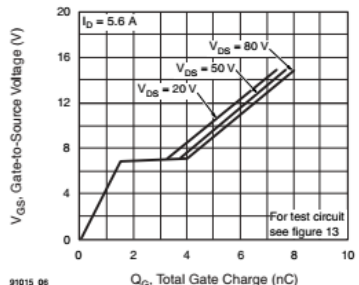
91015_02 **Fig. 2 - Typical Output Characteristics, $T_C = 175\text{ }^\circ\text{C}$**



91015_05 **Fig. 5 - Typical Capacitance vs. Drain-to-Source Voltage**



91015_03 **Fig. 3 - Typical Transfer Characteristics**



91015_06 **Fig. 6 - Typical Gate Charge vs. Gate-to-Source Voltage**



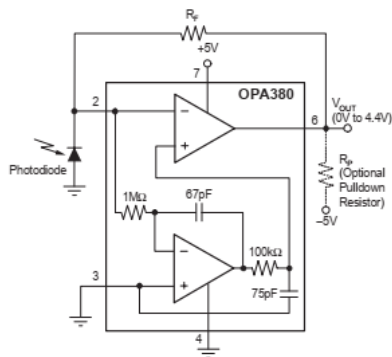
Precision, High-Speed Transimpedance Amplifier

FEATURES

- > 1MHz TRANSIMPEDANCE BANDWIDTH
- EXCELLENT LONG-TERM V_{OS} STABILITY
- BIAS CURRENT: 50pA (max)
- OFFSET VOLTAGE: 25 μ V (max)
- DYNAMIC RANGE: 4 to 5 Decades
- DRIFT: 0.1 μ V/ $^{\circ}$ C (max)
- GAIN BANDWIDTH: 90MHz
- QUIESCENT CURRENT: 7.5mA
- SUPPLY RANGE: 2.7V to 5.5V
- SINGLE AND DUAL VERSIONS
- *MicroSize* PACKAGE: MSOP-8

APPLICATIONS

- PHOTODIODE MONITORING
- PRECISION I/V CONVERSION
- OPTICAL AMPLIFIERS
- CAT-SCANNER FRONT-END



DESCRIPTION

The OPA380 family of transimpedance amplifiers provides high-speed (90MHz Gain Bandwidth [GBW]) operation, with extremely high precision, excellent long-term stability, and very low $1/f$ noise. It is ideally suited for high-speed photodiode applications. The OPA380 features an offset voltage of 25 μ V, offset drift of 0.1 μ V/ $^{\circ}$ C, and bias current of 50pA. The OPA380 far exceeds the offset, drift, and noise performance that conventional JFET op amps provide.

The signal bandwidth of a transimpedance amplifier depends largely on the GBW of the amplifier and the parasitic capacitance of the photodiode, as well as the feedback resistor. The 90MHz GBW of the OPA380 enables a transimpedance bandwidth of > 1MHz in most configurations. The OPA380 is ideally suited for fast control loops for power level on an optical fiber.

As a result of the high precision and low-noise characteristics of the OPA380, a dynamic range of 4 to 5 decades can be achieved. For example, this capability allows the measurement of signal currents on the order of 1nA, and up to 100 μ A in a single I/V conversion stage. In contrast to logarithmic amplifiers, the OPA380 provides very wide bandwidth throughout the full dynamic range. By using an external pull-down resistor to -5V, the output voltage range can be extended to include 0V.

The OPA380 (single) is available in MSOP-8 and SO-8 packages. The OPA2380 (dual) is available in the miniature MSOP-8 package. They are specified from -40 $^{\circ}$ C to +125 $^{\circ}$ C.

OPA380 RELATED DEVICES

PRODUCT	FEATURES
OPA300	150MHz CMOS, 2.7V to 5.5V Supply
OPA350	500 μ V V_{OS} , 38MHz, 2.5V to 5V Supply
OPA335	10 μ V V_{OS} , Zero-Drift, 2.5V to 5V Supply
OPA132	16MHz GBW, Precision FET Op Amp, \pm 15V
OPA656/7	230MHz, Precision FET, \pm 5V
LOG112	LOG amp, 7.5 decades, \pm 4.5V to \pm 18V Supply
LOG114	LOG amp, 7.5 decades, \pm 2.25V to \pm 5.5V Supply
IVC102	Precision Switched Integrator
DDC112	Dual Current Input, 20-Bit ADC

OPA380 OPA2380



SBOS291G – NOVEMBER 2003 – REVISED SEPTEMBER 2007

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS⁽¹⁾

Voltage Supply	..... +7V
Signal Input Terminals ⁽²⁾ , Voltage	..... -0.5V to (V+) + 0.5V
Current	..... ±10mA
Short-Circuit Current ⁽³⁾ Continuous
Operating Temperature Range	..... -40°C to +125°C
Storage Temperature Range	..... -65°C to +150°C
Junction Temperature	..... +150°C
Lead Temperature (soldering, 10s)	..... +300°C
ESD Rating (Human Body Model)	..... 2000V

- (1) Stresses above these ratings may cause permanent damage. Exposure to absolute maximum conditions for extended periods may degrade device reliability. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those specified is not implied.
- (2) Input terminals are diode clamped to the power-supply rails. Input signals that can swing more than 0.5V beyond the supply rails should be current limited to 10mA or less.
- (3) Short-circuit to ground; one amplifier per package.

ELECTROSTATIC DISCHARGE SENSITIVITY



This integrated circuit can be damaged by ESD. Texas Instruments recommends that all integrated circuits be handled with appropriate precautions. Failure to observe proper handling and installation procedures can cause damage.

ESD damage can range from subtle performance degradation to complete device failure. Precision integrated circuits may be more susceptible to damage because very small parametric changes could cause the device not to meet its published specifications.

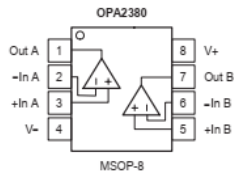
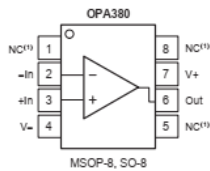
PACKAGE/ORDERING INFORMATION⁽¹⁾

PRODUCT	PACKAGE-LEAD	PACKAGE MARKING
OPA380	MSOP-8	AUN
OPA380	SO-8	OPA380A
OPA2380	MSOP-8	BBX

- (1) For the most current package and ordering information, see the Package Option Addendum at the end of this document, or see the TI web site at www.ti.com.

PIN ASSIGNMENTS

Top View



NOTES: (1) NC indicates no internal connection.

LAMPIRAN C

Data-Data Pengukuran Spektrometer

Tabel 1. LED Cool White Phosphor

I(mA)	CRI	CCT	x	y	u	v	Δ_{uv}	Illuminance (Lux)	Vs(V)	Vd(V)
50	77.3	6664	0.3112	0.3206	0.1999	0.4635	-0.0004	71,4	2,79	2,6978
100	77,3	6762	0.31	0,318	0,2001	0,4619	-0,0011	145	2,924	2,7418
150	77,4	6831	0.3092	0,3161	0,2003	0,4607	-0,0017	218	3,042	2,7706
200	77,5	6872	0.3085	0,3154	0,2002	0,4602	-0,0018	289	3,156	2,793
250	77,4	6918	0.3081	0,3143	0,2002	0,4596	-0,0021	351	3,262	2,8114
300	77,5	6933	0.3078	0,3141	0,2002	0,4594	-0,0021	418	3,366	2,8274
350	77,6	6950	0.3076	0,3139	0,2001	0,4592	-0,0021	483	3,466	2,8404
450	77,8	6983	0.3073	0,3135	0,1999	0,459	-0,0021	608	3,666	2,865
500	78,1	7026	0.3067	0,3129	0,1998	0,4585	-0,0021	667	3,766	2,8754
550	78,2	7041	0.3065	0,3128	0,1997	0,4584	-0,0021	727	3,852	2,8842
600	78,3	7052	0.3064	0,3128	0,1996	0,4584	-0,002	785	3,938	2,893
650	78,4	7066	0.3062	0,3126	0,1995	0,4583	-0,002	843	4,03	2,9016
700	78,5	7078	0.306	0,3127	0,1993	0,4583	-0,0018	897	4,116	2,908

Tabel 2. LED Lime (535nm)

I(mA)	CRI	CCT	x	y	u	v	Δ_{uv}	Illuminance (Lux)	Vs(V)	Vd(V)
50	44.3	4288	0.4078	0.5514	0.1854	0.5639	0.0570	90,2	2,774	2,6746
100	44.4	4290	0.4077	0.5515	0.1853	0.5639	0.0571	182	2,904	2,7096
150	45.0	4294	0.4074	0.5511	0.1852	0.5637	0.0570	271	3,026	2,734
200	45.3	4294	0.4073	0.5508	0.1852	0.5636	0.0569	358	3,14	2,7538
250	45.3	4294	0.4074	0.5509	0.1853	0.5637	0.0570	444	3,254	2,7706
300	45.7	4294	0.4073	0.5504	0.1853	0.5635	0.0569	528	3,364	2,7864
350	45.6	4291	0.4074	0.5504	0.1854	0.5636	0.0568	609,8	3,478	2,8002
400	45.6	4288	0.4076	0.5504	0.1855	0.5636	0.0568	688	3,602	2,8136
450	45.7	4286	0.4077	0.5502	0.1856	0.5635	0.0567	764,8	3,708	2,8258
500	46.0	4285	0.4077	0.5498	0.1857	0.5634	0.0566	842,6	3,816	2,8374
550	46.1	4282	0.4079	0.5496	0.1858	0.5634	0.0565	918,8	3,93	2,8486
600	46.0	4279	0.4081	0.5497	0.1859	0.5635	0.0564	993,4	4,04	2,859
650	46.1	4276	0.4082	0.5494	0.1861	0.5634	0.0563	1070	4,15	2,869

700	46.2	4273	0.4084	0.5493	0.1862	0.5634	0.0563	1140	4,266	2,879
-----	------	------	--------	--------	--------	--------	--------	------	-------	-------

Tabel 3. LED Biru (450nm)

I(mA)	x	y	u	v	Illuminance (lux)	Vs(V)	Vd(V)
50	0,1501	0,0272	0,1984	0,0809	13,98	2,78	2,6808
100	0,1501	0,0261	0,2007	0,078	25,94	2,926	2,721
150	0,1516	0,0254	0,202	0,0761	36,82	3,054	2,7486
200	0,1519	0,0249	0,2028	0,075	47,26	3,172	2,7708
250	0,1521	0,0248	0,2033	0,0745	57,22	3,292	2,7896
300	0,1523	0,0246	0,2036	0,0741	66,8	3,412	2,8066
350	0,1524	0,0246	0,2039	0,0739	76,16	3,512	2,8216
400	0,1525	0,0244	0,2041	0,0735	85,12	3,62	2,8354
450	0,1525	0,0245	0,2041	0,0737	94,06	3,72	2,8476
500	0,1525	0,0246	0,204	0,0739	103	3,816	2,8592
550	0,1524	0,0245	0,2039	0,0739	112	3,916	2,8698
600	0,1524	0,0246	0,2038	0,0741	120,6	4,018	2,8796

650	0,1524	0,0247	0,2037	0,0742	129	4,126	2,8886
700	0,1523	0,0248	0,2035	0,0746	137,4	4,214	2,8972

Tabel 4. LED Hijau (535nm)

I(mA)	x	y	u	v	Illuminance (Lux)	Vs(V)	Vd(V)
50	0.2228	0.7278	0.0789	0.5803	104	3,014	2,8958
100	0.2105	0.7302	0.0743	0.5795	193	3,21	2,98
150	0.2027	0.7317	0.0713	0.5789	271	3,386	3,0394
200	0.1967	0.7330	0.0690	0.5786	341	3,554	3,088
250	0.1919	0.7322	0.0673	0.5779	406,4	3,7	3,1302
300	0.1880	0.7315	0.0660	0.5774	466,2	3,832	3,1672
350	0.1849	0.7307	0.0649	0.5769	522	3,974	3,2008
400	0.1824	0.7282	0.0641	0.5762	574,8	4,14	3,2326
450	0.1803	0.7269	0.0635	0.5758	621,8	4,282	3,2616
500	0.1786	0.7248	0.0630	0.5752	669	4,41	3,2892
550	0.1772	0.7226	0.0626	0.5747	713	4,546	3,3132

600	0.1760	0.7211	0.0623	0.5743	753,6	4,666	3,3366
650	0.1750	0.7192	0.0621	0.5738	790,4	4,792	3,3588
700	0.1746	0.7161	0.0621	0.5732	827,2	4,906	3,3796

Tabel 5. LED Merah (630nm)

I(mA)	x	y	u	v	Illuminance (Lux)	Vs(V)	Vd(V)
50	0.6797	0.3036	0.5145	0.5172	28,58	1,906	1,7982
100	0.6811	0.3030	0.5166	0.5171	57,58	2,064	1,8422
150	0.6816	0.3031	0.5169	0.5172	85,84	2,208	1,875
200	0.6813	0.3022	0.5177	0.5167	113,4	2,354	1,9026
250	0.6817	0.3027	0.5175	0.5170	140,8	2,47	1,9266
300	0.6813	0.3021	0.5178	0.5167	167	2,584	1,949
350	0.6820	0.3021	0.5185	0.5168	192	2,706	1,9694
400	0.6818	0.3017	0.5187	0.5165	216	2,816	1,9886
450	0.6839	0.3017	0.5209	0.5169	238,4	2,928	2,0068
500	0.6836	0.3013	0.5209	0.5167	260,6	3,044	2,0238

550	0.6836	0.3013	0.5210	0.5167	283	3,15	2,04
600	0.6842	0.3011	0.5218	0.5167	303,4	3,266	2,0556
650	0.6839	0.3008	0.5219	0.5165	323	3,374	2,0702
700	0.6834	0.3004	0.5219	0.5161	341,6	3,484	2,084

Tabel 6. LED Lime-Red

I(mA) LED Merah	LED Lime: 50 mA	LED Lime: 100 mA	LED Lime: 150 mA	LED Lime: 200 mA	LED Lime: 250 mA	LED Lime: 300 mA	LED Lime: 350 mA	LED Lime: 400 mA	LED Lime: 450 mA	LED Lime: 500 mA	LED Lime: 550 mA	LED Lime: 600 mA	LED Lime: 650 mA	LED Lime: 700 mA
	CRI	CRI	CRI	CRI	CRI	CRI	CRI	CRI	CRI	CRI	CRI	CCT	CRI	CRI
50	80,6	76	68	62,7	59,1	56,6	55,1	53,9	52,9	51,9	51	51,1	50,2	49,9
100	72,2	80,3	80,5	75,6	71,3	68,1	65,7	63,5	61,6	60,2	59	58,1	57,2	56,2
150	-	75,6	80,3	81,8	79,3	76,1	73,3	71,3	68,8	67,1	65	64,5	62,8	62
200	-	71,6	77,1	80,1	81,4	80,7	78,4	76,2	74,3	72,6	70,5	69,6	67,9	66,7
250	-	69,2	73,8	77,7	79,7	81,2	80,9	79,4	77,8	75,8	75,1	73,5	72,1	70,8
300	-	-	71	75	78,1	78,7	81	81,1	80,5	79,3	79,1	76,7	75,5	74
350	-	-	69,1	73,8	75,7	78	79,5	80,5	81,1	80,8	80,7	78,9	77,7	76,3
400	-	-	67,7	70,5	73,7	76,3	78,3	79,6	80,5	80,9	81,2	80,4	79,7	78,4

BIODATA PENULIS**Anak Agung Ngurah Arymurti Santosa**

adalah putra kedua dari Ir. I Gusti Ngurah Oka Santosa, M.M. dan Dr. dr. Anak Agung Ayu Putri Laksmidewi, Sp.S(K) yang lahir di Denpasar, 22 September 1998. Penulis memulai pendidikan di TK. Cipta Dharma Denpasar pada tahun 2002-2004, selanjutnya SD Cipta Dharma Denpasar pada tahun 2004 sampai tahun 2010. Kemudian melanjutkan pendidikan di SMP Negeri 1 Denpasar pada tahun 2010 dan lulus pada tahun 2013. Penulis melanjutkan pendidikan di SMA Negeri 1 Denpasar dan mengikuti program akselerasi tahun 2013 dan lulus pada tahun 2015. Pada tahun 2015 penulis terdaftar sebagai mahasiswa di Departemen Teknik Fisika ITS. Penulis juga aktif sebagai Asisten Laboratorium Rekayasa Fotonika Teknik Fisika ITS hingga tahun ketiga. Penulis pernah mengikuti PIMNAS ke 30 di Makassar pada tahun 2017. Pada tahun 2018 terpilih sebagai president Society Photonics and Optics International Engineering/ SPIE ITS Student Chapter dan mendapatkan Grant untuk mengikuti The International Society for Optics & Photonics dan OPIC The Optics & Photonics International Congress pada bulan April 2019 di Yokohama Jepang. Penulis melaksanakan Kerja Praktek bulan Juli tahun 2018 dan Penelitian Tugas Akhir di Lab. Photonics BPPT (Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi) di Serpong Tangerang pada tahun 2019.

Penulis dapat dihubungi melalui email:
santosaarymurti@gmail.com