

# Desain Awal Analog Front-End Optical Transceiver untuk Aplikasi Visible Light Communication

Trio Adiono<sup>1</sup>, Syifaul Fuada<sup>2</sup>, Angga Pratama Putra<sup>3</sup>, Yulian Aska<sup>4</sup>

**Abstract**— Analog Front-End (AFE) is a part of physical layer (PHY) at Visible Light Communications (VLC) system which has important things to transmit and receive the data. This research is a preliminary study in designing AFE transceiver which consists of LED driver and Trans-impedance Amplifier (TIA). The results are used as advanced reference design of AFE system and also to determine the modulations range (analog as well as digital). The design verification is based on data transmission which generated by signal generator. Square wave signal is used as digital modulation representative, and sinusoid signal as analog modulation representative. The range of VLC channels is about 50 cm with 0° angle. The result shows that digital modulation bandwidth is about 1 KHz to 10 KHz frequency, and analog modulation bandwidth is from 200 KHz to 600 KHz. We also find a significant impact by adding 1 pF capacitor to reduce noise gain. Furthermore, color filter testing is performed to investigate the design performance.

**Intisari**—Analog Front-End (AFE) merupakan bagian dari physical layer pada sistem Visible Light Communications (VLC) yang memiliki peran penting dalam transmisi dan menerima data. Makalah ini merupakan studi awal dalam perancangan transceiver AFE yang terdiri atas driver LED dan Trans-impedance Amplifier (TIA). Hasil pengujian dipergunakan sebagai referensi untuk mendesain AFE yang lebih kompleks dan sebagai acuan dalam penentuan range masing-masing modulasi. Verifikasi rancangan dilakukan dengan cara mentransmisikan data berupa sinyal yang dibangkitkan oleh signal generator, dengan sinyal kotak sebagai representasi dari modulasi digital dan sinyal sinus sebagai representasi modulasi sinyal analog. Jarak kanal adalah 50 cm dengan sudut elevasi 0°. Hasil menunjukkan bahwa bandwidth modulasi digital adalah dari 1 KHz sampai dengan 10 KHz, sedangkan pada modulasi analog adalah dari 200 KHz sampai dengan 600 KHz. Hasil verifikasi lain adalah dengan menggunakan filter warna untuk mengetahui unjuk kerja rancangan serta pengaruh penambahan kapasitor untuk mengkompensasi noise gain.

**Kata Kunci**— Visible Light Communication, Analog Front-End, Transceiver

## I. PENDAHULUAN

Perkembangan sistem telekomunikasi selaras dan beriringan dengan kemajuan teknologi komunikasi dan informasi [1]. Visible Light Communication (VLC) atau komunikasi cahaya tampak merupakan teknologi komunikasi nirkabel yang sedang populer selama beberapa tahun ini dan diasumsikan akan terus berlanjut beberapa dekade ke depan.

<sup>1,2,3,4</sup>Pusat Penelitian Mikroelektronika, Institut Teknologi Bandung, Jl. Tamansari No. 126, Bandung, 40132, INDONESIA (telp: 022-250-6280; E-mail: tadiono@stei.itb.ac.id; syifaulfuada@students.itb.ac.id)

Hal ini karena teknologi VLC menawarkan beberapa keunggulan dibandingkan komunikasi nirkabel sebelumnya yakni Radio Frequency (RF) dan infrared (IR) [2], seperti di antaranya mampu mentransfer dengan kecepatan mencapai GHz, tidak memiliki interferensi elektromagnetik, bebas lisensi karena independen, lebih aman (*secure*) karena sifat cahaya tidak dapat menembus penghalang, dan infrastruktur telah tersedia pada rumah hunian manusia saat ini yakni berupa lampu penerangan sehingga bersifat *low cost*.

Komunikasi cahaya tampak dapat dilakukan dengan menggunakan LED sebagai transmitter dan photo-detector (PD) berupa sel surya, photodiode, atau phototransistor sebagai receiver. Transmitter mengubah sinyal listrik menjadi sinyal optik, sementara receiver atau detector berfungsi untuk mengubah daya optik (*optical power*) menjadi arus listrik. Transmisi data dapat dilakukan dengan mengubah level iluminasi LED pada sisi transmitter untuk menentukan logika *high* atau *low*. Kemudian photodiode pada sisi receiver membangkitkan pulsa yang linier terhadap level iluminasi yang diterima [3]. Pengaturan level iluminasi LED dan pengolahan sinyal output dari rangkaian photodiode beserta AFE tersebut dilakukan oleh perangkat mikrokontroler.

Teknologi VLC bertajuk Light Fidelity (Li-Fi) pernah didemonstrasikan kepada khalayak umum oleh Prof. Harald Haas di forum TEDx [4]. Sistem komunikasi tersebut mampu melakukan streaming video dengan kualitas HD. Hal ini menunjukkan bahwa teknologi VLC menjadi teknologi alternatif yang potensial untuk menyediakan akses kecepatan tinggi bagi perangkat seperti tablet, laptop, smartphone, dan perangkat-perangkat lain dalam ruang (*indoor environment*). Sebuah penelitian berhasil mencapai kecepatan transmisi data hingga 1 Gbps menggunakan LED warna merah, hijau, dan biru, serta lensa optik dengan jarak kanal antara transmitter dan receiver beberapa sentimeter [5]. Eksperimen lain mampu mentransmisikan hingga 500 Mb/s dengan bagian receiver dilengkapi RC-post equalizer satu tingkat [6]. Sedangkan dengan RC-post equalizer tiga tingkat mampu dikirimkan data hingga 340Mb/s [7]. Pada ketiga penelitian tersebut, data-data yang dikirimkan adalah berupa sinyal yang dibangkitkan oleh signal generator sebagai verifikasi rancangan. Selanjutnya, eksperimen tentang pengiriman sinyal audio melalui LED dengan jarak beberapa sentimeter dengan output berupa loudspeaker juga telah dilakukan [8].

Platform VLC terdiri atas tiga bagian utama, yakni transmitter, receiver, dan kanal. Sedangkan menurut layer, dibagi menjadi lima bagian utama yakni, Physical, MAC, Internet, Transport, dan Application. Kelima hal tersebut merupakan pembangun sistem VLC yang masing-masing memiliki tantangan tersendiri dalam mendesain dan saat interkoneksi dengan layer lainnya. Layer physical terdiri atas

rangkaian AFE *transmitter* dan *receiver*. Tantangan utama pada layer *physical* adalah pada bagian perancangan *driver* LED, pemilihan LED, pemilihan *photodiode*, dan konfigurasi rangkaian *amplifier*.

*Driver* LED harus mampu mendukung berbagai jenis modulasi, baik digital maupun analog, sehingga dapat dipakai untuk mentransmisikan data mencapai beberapa MHz bahkan dengan jarak optimal (sampai >3meter), serta dapat terintegrasi dengan rangkaian *power supply* agar dapat dihubungkan langsung dengan listrik jala-jala 220V<sub>ac</sub>. LED yang dipergunakan juga harus tepat yakni memiliki frekuensi *cut-off* yang tinggi dan dengan sudut elevasi lebar antara *transmitter* dan *receiver*. Pada *receiver*, rangkaian analog sebagai pengkondisi sinyal yang diterima oleh PD harus menyesuaikan spesifikasi dari *transmitter* [9]. Selain itu, perancangan *transceiver* AFE adalah hal yang substansial dan sangat mempengaruhi unjuk kerja sistem VLC itu sendiri, baik dari segi kecepatan transfer, *bit error rate*, maupun ketahanan terhadap *ambient light* dan *noise*.

Penelitian terkait telah dilakukan yaitu merancang *driver* LED dengan fungsi ganda, yakni sebagai perangkat komunikasi dan iluminasi pencahayaan [10]. Telah dibuat juga produk lampu *bulb* sebagai perangkat komunikasi VLC [11]. Penelitian lain adalah pembuatan *driver* LED yang bersifat sederhana dan *low-cost* namun mampu mentransmisikan data sinyal hingga 50 Mbps [12], dan pemakaian konfigurasi *driver* LED *common-emitter* untuk mengirimkan teks berbasis sinyal kotak (modulasi PPM) [13]. Pada bagian *receiver*, telah dibahas khusus tentang pemanfaatan sel surya sebagai penerima sinyal informasi dari LED [14]. Selanjutnya telah dirancang juga AFE yang sesuai dengan modulasi *m-ary* [15].

Perbedaan makalah ini dengan penelitian sebelumnya terletak pada desain dan implementasi. Sistem ini difungsikan pada aplikasi *indoor* yang mampu dipakai untuk modulasi digital maupun analog, mampu mentransmisikan data dengan kecepatan yang tinggi (*high bit rate*), dan untuk minimasi *ambient light noise*. Sementara, tujuannya adalah untuk merancang, mengimplementasikan, dan mengevaluasi sistem *transceiver* pada bagian AFE untuk aplikasi VLC. Makalah ini merupakan sebuah studi awal yang hasil pengujian dari eksperimen ini dapat dijadikan referensi oleh untuk membuat desain sistem AFE lebih lanjut, dimulai dari rancangan penguat operasional (*pre-amp*), rancangan DC *offset*, *output* maksimal dari rangkaian AFE *receiver*, rancangan *Digital Signal Processing* (DSP) pada bagian *Analog to Digital Converter* (ADC), dan ketepatan perancangan *analog filters*.

Makalah ini terbagi menjadi lima bagian utama. Bagian pertama mengenalkan tentang teknologi VLC, latar belakang, dan tujuan. Bagian kedua menjelaskan tentang spesifikasi sistem yang mengacu pada *platform* komunikasi berbasis VLC, memaparkan prosedur eksperimen yang diawali dengan perancangan *transmitter* mencakup tentang: pemilihan mode *driver* LED, pemilihan LED yang dipergunakan sebagai media pengirim informasi, dan pemilihan transistor. Selanjutnya prosedur perancangan *receiver* mencakup tentang: pemodelan *photodiode* dan mode operasinya, pemilihan

*photodiode* yang dipergunakan sebagai media penerima informasi, pemilihan OP-AMP, menghitung *gain* pada rangkaian TIA, dan kapasitor umpan balik ( $C_f$ ). Bagian ketiga menjelaskan hasil dan analisis eksperimen, dan bagian keempat adalah kesimpulan dan saran penelitian selanjutnya.

## II. METODOLOGI

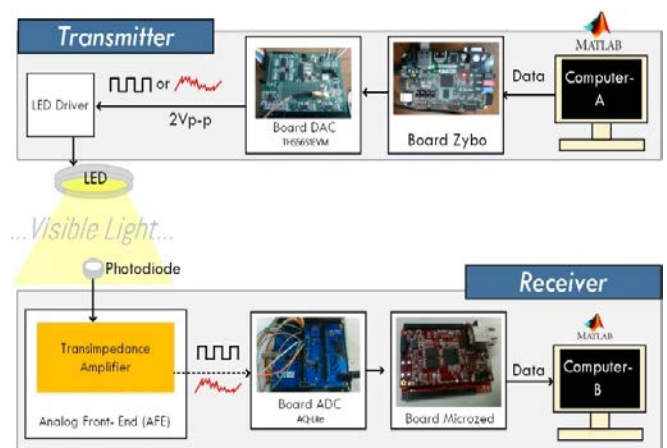
Langkah pertama yang dilakukan adalah menentukan spesifikasi sistem yang digunakan, mendesain rangkaian untuk *transmitter* dan *receiver*, penentuan spesifikasi OP-AMP, menghitung *gain* dan nilai kapasitor kompensator, serta menyusun skenario pengujian.

### A. Spesifikasi Sistem

*Platform* sistem komunikasi cahaya tampak mengacu pada diagram blok yang ditunjukkan pada Gbr. 1. Sistem terdiri atas beberapa blok. Bagian *transmitter* terdiri atas Komputer A dengan program Matlab, *board* Zybo®, *Digital to Analog Converter* (DAC) *board*, rangkaian *driver* LED, dan LED. Bagian *receiver* terdiri atas *photodiode*, rangkaian AFE *receiver* yang dalam eksperimen ini hanya meliputi rangkaian *Transimpedance Amplifier* (TIA), ADC *board*, *Microzed*® *board*, dan komputer B.

Fokus utama dalam eksperimen ini adalah pada bagian AFE *transceiver*. Komunikasi dilakukan terbatas pada media sinyal sinus dan kotak yang dibangkitkan oleh *signal generator*, dan selanjutnya diterima oleh rangkaian TIA yang merupakan rangkaian yang berfungsi untuk mengubah arus yang dibangkitkan oleh *photodiode* menjadi tegangan. Pada saat menerima cahaya, *photodiode* mengubahnya menjadi arus listrik. Fokus penelitian tentang desain TIA dan analisis *noise* didiskusikan pada makalah lain [16], [17].

Referensi-referensi hasil pengujian dipergunakan untuk perancangan sistem lebih lanjut, seperti perancangan *amplifier*, DC *offset*, dan seterusnya. Nantinya, *platform* ini dapat dipergunakan untuk mengirim media berupa gambar/foto, *running text*, MP3, MP4, dan video dengan kualitas HD.



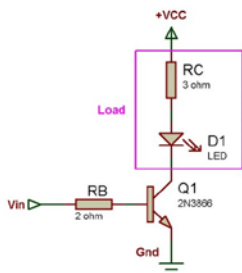
Gbr. 1 Rangkaian keseluruhan sistem komunikasi cahaya tampak (VLC).

Berdasarkan Gbr. 1, sinyal pada *transmitter* diperoleh dari DAC *board* THS 5651EVM yang memiliki spesifikasi *output* maksimal 2V<sub>pp</sub>, sehingga untuk memverifikasi uji coba

pengiriman sinyal informasi, *setting* sinyal output dari *signal generator* adalah dengan amplitude  $2V_{pp}$  dan *offset null*.

**B. Desain Rangkaian Transmitter**

1) *Mode driver LED*: Secara umum *driver LED* dibagi menjadi dua bagian, yakni *linear LED driver* dan *switch mode LED driver* [18]. *Switch mode LED driver* bekerja dengan kondisi padam atau kondisi ‘0’ dan menyala atau kondisi ‘1’. Topologi ini memiliki efisiensi yang tinggi dengan rangkaian lebih ringkas. *Driver LED* ini sesuai dipergunakan untuk modulasi digital. Sedangkan *driver LED* linier mempunyai efisiensi yang rendah, namun dapat mendukung modulasi analog. Karenanya, sinyal OFDM yang dikeluarkan oleh mikrokontroller harus terkoneksi dalam daerah kurva linier kerja LED sehingga sinyal informasi dapat ditransmisikan oleh LED dengan benar.

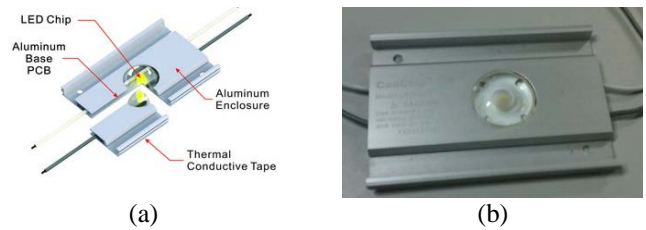


Gbr. 2 Driver LED konfigurasi *Ground Emitter*.

Dalam eksperimen ini dipergunakan rangkaian *driver LED* pada *switch mode*. Namun, saat pengujian juga dipergunakan untuk mengirimkan sinyal sinus. Konfigurasi yang dipilih adalah *common emitter* dengan LED tunggal. Konfigurasi ini dapat dilihat pada Gbr. 2. Rangkaian ini sering disebut dengan *Ground Emitter configuration*. Karakteristik dari konfigurasi ini adalah mudah diimplementasikan dengan komponen-komponen yang telah tersedia dipasaran dengan tegangan ~10V, mendukung untuk diterapkan dalam bentuk *Surface mount device* (SMD), karena sederhana, *compact* dengan ukuran yang minimalis, serta dapat melakukan *on-off switch* sampai Megahertz (MHz). Hal ini tidak dapat dilakukan pada konfigurasi *Darlington* yang tipikal *slow switching speed*.

2) *Pemilihan LED*: Modul LED yang digunakan adalah Coochip® produksi Hyrite Lighting. Co. sebagai media pengirim informasi cahaya tampak [19]. Alasan pemilihan LED ini adalah karena *low cost*, *high viewing angle* sampai  $178^\circ$  sehingga memungkinkan untuk mendukung *mobile VLC*, ringan, luminansi yang cukup terang, serta dilengkapi dengan *aluminium heatsink* untuk mereduksi panas berlebih sehingga disinyalir mempunyai umur yang lebih panjang dari LED pada umumnya.

Tabel I merupakan informasi mengenai produk LED. Berdasarkan *datasheet*, satu modul LED Coochip® membutuhkan *forward voltage* ( $V_f$ ) = 12 V dengan *forward current* ( $I_f$ ) = 750 mA. Gbr. 3(a) merupakan anatomi dari modul LED Coochip®, yang terdiri atas *chip LED*, PCB dengan *base aluminium*, dan konduktivitas panas. Sedangkan Gbr. 3(b) menunjukkan bentuk fisik modul LED tersebut.



Gbr. 3 Modul Coochip (a) Anatomi LED Coochip; (b) bentuk fisik LED.

TABEL I  
SPESIFIKASI LED

Model no.	LEDMD-W110C
Color	White
Current Control	Linear Constant
Wave length (nm)	10000K
Unit watt	9 Watt
Module voltage	12 VDC
Module current	750mA
Viewing angle	178°
Luminance	550 lm
Life Time(hrs,ta=25 °C)	75,000
Modules distance	400 mm
Dimensions(L*W*H)	80*62*8 mm

Untuk itu rancangan *driver LED* harus tepat untuk mengkondisikan kesesuaian dengan parameter tersebut. Beberapa konfigurasi rangkaian yang dapat dipergunakan yakni rangkaian *common emitter*, *common collector*, konfigurasi *current limiter*, *push pull*, dan *transistor darlington* [20].

3) *Pemilihan Transistor*: Modul LED dihubung seri dengan *driver transistor* 2N3866. Transistor ini diproduksi oleh Motorola®, berjenis BJT dengan kemampuan *switching* mencapai 400 MHz, sehingga sangat berpotensi untuk mendukung aplikasi *high speed VLC*. Transistor ini mampu mengendalikan arus *bias kolektor* ( $I_c$ ) sampai 400 mA. Selain itu harganya cukup terjangkau dan tersedia di pasaran Indonesia. Detail spesifikasi transistor tersebut ditunjukkan pada Tabel II.

TABEL II  
SPESIFIKASI TRANSISTOR YANG DIPERGUNAKAN PADA EKSPERIMEN

Model no.	2N2866
Output Power	400 MHz
Maximum Gain	10 dB
Output Power	1 Watt
Efisiensi	45%
Vce (sat)	1 V saat $I_c = 100$ mA
hfe (min)	5 saat $I_c = 360$ mA

Berdasarkan *datasheet*, transistor ini memiliki  $V_{CE}$  (sat) maksimum = 1V dan  $h_{fe}$  atau  $\beta$  minimal = 5. Untuk menghitung resistor *current limiter* pada kaki kolektor transistor adalah dengan menggunakan (1), sedangkan resistor pada basis ( $R_b$ ) dihitung menggunakan (2) dan arus pada basis dihitung dengan (3).

$$R_C = \frac{V_{CC} - V_{fLED_{tipikal}} - V_{CE(sat)}}{I_F} \tag{1}$$

$$R_B = \frac{V_{input\ from\ microcontroller} - V_{BE}}{I_B} \quad (2)$$

$$I_B = \frac{I_C}{h_{FE}} \quad (3)$$

Untuk menghitung daya yang dihasilkan oleh transistor digunakan (4).

$$P_{transistor} = V_{CE(sat)} * I_C \quad (4)$$

Berdasarkan (1), maka nilai resistor pada kaki kolektor ( $R_C$ ) adalah sebagai berikut,

$$R_C = \frac{15V - 12V - 1V}{750\ mA} = 2,67\ \Omega = 3\ \Omega$$

$$I_B = \frac{750\ mA}{100} = 7,5\ mA$$

Berdasarkan perhitungan menggunakan (3), arus basis ( $I_B$ ) adalah 7,5 mA. Kaki basis transistor mendapat *input* dari *output* ADC Analog Device sebesar  $2V_{pp}$ , sedangkan nilai  $V_{BE}$  adalah 0,7  $V_{DC}$  (konstanta), sehingga tegangan yang melewati  $R_B$  adalah 1,4  $V_{DC}$ . Untuk mendapatkan nilai resistor pada basis ( $R_B$ ), dapat dihitung sebagai berikut,

$$R_B = \frac{2V - 0,7V}{7,5\ mA} = 173,3\ \Omega = 180\ \Omega$$

Mengacu pada (4), daya yang dihasilkan pada transistor adalah,

$$P_{transistor} = 1\ V * 0,75\ A = 0,75\ Watt$$

Transistor 2N3866 dengan daya maksimal 1 Watt ini dianggap memenuhi kebutuhan di atas. Semua resistor yang digunakan pada rangkaian *transmitter* mampu melewati daya hingga 1 Watt. Gbr. 4 merupakan bentuk fisik transistor.



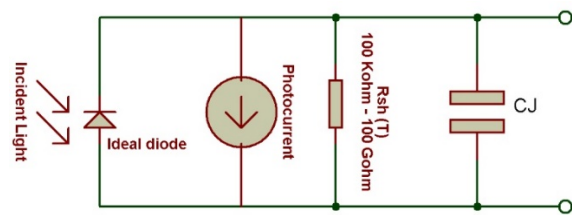
Gbr. 4 Bentuk fisik transistor 2N3866.

### C. Desain Rangkaian Receiver

1) *Photodiode Pre-Amp Models*: *Photodiode* menghasilkan arus kecil yang proporsional terhadap tingkat iluminasi cahaya. Aplikasinya bermacam-macam, yakni mulai dari alat ukur intensitas cahaya dengan presisi sampai aplikasi penerima *fiber optic* ataupun VLC [21]. Rangkaian ekuivalen dari *photodiode* ditunjukkan pada Gbr. 5.

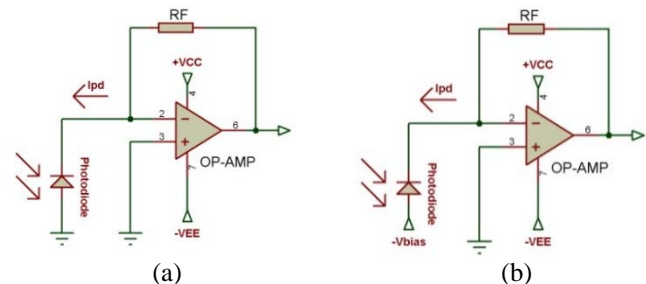
Umumnya,  $R_{sh}$  atau *shunt resistor* bernilai 1  $G\Omega$  pada suhu ruang. Sedangkan  $C_j$  (*junction capacitor*) atau disebut juga dengan istilah  $C_T$  (*terminal capacitor*) adalah kapasitans intrinsik dari *photodiode* tersebut. Nilai kapasitansnya sebesar 50 pF saat *bias nol*, yang merupakan tipikal paling minimum dari nilai kapasitans. Pada *photodiode* terdapat arus gelap

(*dark current*) yakni menghasilkan arus meskipun dalam keadaan tanpa cahaya. Besar *dark current* memiliki tipikal *bias* mundur sebesar 10 mV [22].



Gbr. 5 Pemodelan *photodiode*.

Terdapat dua mode operasi pada *photodiode*, yakni *photoconductive* dan *photovoltaic*, yang masing-masing mempunyai kelebihan dan kekurangan. Mode *photovoltaic* mempunyai karakteristik tanpa *bias*, tidak mempunyai *dark current*, *linear*, *low noise*, dan sesuai untuk aplikasi instrumentasi yang presisi. Sedangkan mode *photoconductive* mempunyai karakteristik membutuhkan *bias* mundur (*reverse bias*), memiliki *dark current*, *nonlinear*, memiliki *noise* yang besar, dan sesuai untuk aplikasi *high speed*. Ilustrasi konfigurasi mode ditunjukkan pada Gbr. 6.



Gbr. 6 Konfigurasi rangkaian *trans-impedance amplifier*: (a) mode *photovoltaic*; (b) mode *photoconductive*.

Pada aplikasi komunikasi VLC ini, dipilih mode *photovoltaic* karena mempunyai sifat tipikal *low noise* dan presisi, sehingga diharapkan sinyal informasi dari LED dapat diterima dengan *noise* yang minimum. Mengenai kebutuhan *high speed* dapat dicapai dengan pemilihan OP-AMP dengan sifat tipikal *high bandwidth* dan *photodiode* dengan sifat tipikal mampu menghasilkan arus yang besar.

2) *Spesifikasi Photodiode yang Digunakan*: Dipilih *photodiode* seri S1336-44BK produksi Hamamatsu® yang merupakan *photodiode* Si untuk aplikasi *UV to near IR for precision photometry*. *Photodiode* ini mampu mendeteksi cahaya infra merah dengan rentang gelombang 320 nm – 1100 nm, dan waktu *switching* (*rising time* dan *falling time*) maksimum sebesar 0,5  $\mu s$ . Parameter detail disajikan dalam Tabel III.

Semakin besar area *photodiode* (misalnya 10 mm x 10 mm), maka frekuensi *cut-off* semakin sempit dan cenderung mudah terganggu oleh *ambient light noise*, namun memiliki area *sensing* yang luas sehingga mendukung mobilitas VLC. Rata-rata *photodiode* dengan frekuensi *cut-off* yang tinggi adalah yang bersifat tipikal area *sensing* sempit yakni sekitar 0,2 mm. Salah satu pertimbangan pemilihan *photodiode* adalah panjang

gelombang yang dapat dideteksinya (*sensing*). Umumnya produk *photodiode* yang tersedia di pasaran adalah untuk aplikasi *visible range* samapi *near IR range*.

TABEL III  
SPESIFIKASI PHOTODIODE YANG DIGUNAKAN PADA EKSPERIMEN

Parameter	Nilai
Type Photodiode	S1336-44BK
Spectral response range $\lambda$	320 to 1100 nm
Short circuit current ( $I_{sc}$ ) at 100 lx	Minimal 8 $\mu$ A (tipikal 10 $\mu$ A)
Dark Current ( $I_d$ )	50 pA
Rise Time	0,5 $\mu$ s
Terminal Capacitance ( $C_t$ ) at $V_R=0V$	150 pF
Rsh	Minimal 0,2 G $\Omega$ (tipikal 0,6 G $\Omega$ )
Noise	10 <sup>-2</sup> p W/ $\sqrt$ Hz
Photosensitive area size	3,6 mm x 3,6 mm
Maximum Reverse Voltage ( $V_R$ )	5V <sub>DC</sub>

Untuk aplikasi VLC, lebih tepat dengan menggunakan *photodiode* khusus untuk *visible range*. Namun rata-rata jenis *photodiode* ini menghasilkan *short current* yang kecil sehingga dibutuhkan *gain* OP-AMP yang sangat besar yang berdampak pada sempitnya *bandwidth* yang diperoleh nantinya. *Photodiode* memiliki bermacam-macam sifat, di antaranya *high sensitivity*, *high speed*, atau *photodiode* yang terintegrasi dengan *pre-amp* dalam satu *chip* seperti jenis S8745 dan S9295 produksi HAMAMATSU®. Masing-masing sifat tersebut memiliki keunggulan dan kelemahan tersendiri apabila diaplikasikan dalam suatu sistem.

3) *Spesifikasi IC OP-AMP*: Tabel IV menampilkan spesifikasi OP-AMP AD8011AN yang merupakan produksi Analog Devices. Inc. OP- AMP ini memiliki kemampuan *low power*, *high speed*, *fast settling time*, *low distortion*, dan *low capacitance*. OP-AMP ini sesuai digunakan sebagai *amplifier photodiode high speed* pada aplikasi VLC. Saat *gain* dari OP-AMP, G, bernilai 1, maka *bandwidth* yang dihasilkan atau GBP adalah 300 MHz.

Frekuensi produk *bandwidth* atau fGBWP idealnya paling tidak 40% sampai 50% dari frekuensi OP-AMP saat G = 1 [23]. Selanjutnya, dapat diperkirakan sekitar 120 MHz.

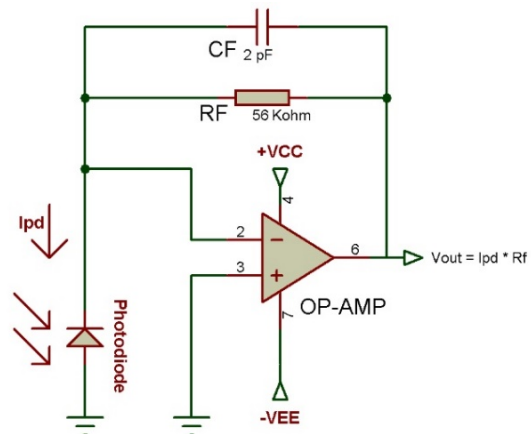
TABEL IV  
SPESIFIKASI OP-AMP YANG DIPERGUNAKAN DALAM EKSPERIMEN

Parameter	Nilai
Type OP-AMP	AD 8011 AN
Input Capacitance ( $C_{in}$ )	2,3 pF
Rise and Fall Time	0,4 ns
Gain Bandwidth Product (GBP)	300 MHz (G = +1)
Voltage Noise Density ( $e_n$ )	2nV/ $\sqrt$ Hz
Current Noise Density ( $i_n$ )	5pA/ $\sqrt$ Hz
Slew Rate	3500 V/us
OP-AMP saturation	+4,1 V and -4,1V

4) *Menghitung Gain & Kapasitor kompensasi*: Rangkaian TIA terdiri atas sebuah OP-AMP dan resistor *feedback* ( $R_f$ ). *Output* dihitung dengan mengalikan arus yang dibangkitkan oleh *photodiode* dengan nilai  $R_f$ . Untuk mengkompensasi *noise* akibat penguatan oleh OP-AMP, dapat dipasang  $C_f$  atau *capacitor feedback* yang dirangkai paralel dengan  $R_f$ . Fungsi

dari  $R_f$  adalah untuk menentukan berapa *gain* yang diperlukan [24].

Gbr. 7 merupakan rangkaian *receiver* pada sistem VLC yang digunakan, yang terdiri atas IC OP-AMP, *capacitor feedback*, *resistor feedback*, dan *photodiode*.



Gbr. 7 Rangkaian TIA.

Berdasarkan Tabel III, diketahui dalam ruangan yang gelap *photodiode* membangkitkan *dark current* sebesar 50 pA yang berasal dari *ambient light*. Arus maksimum yang mampu dibangkitkan oleh *photodiode* adalah sebesar 10  $\mu$ A, sementara tegangan *output* saturasi OP-AMP adalah 4,1 V<sub>DC</sub>. Maka nilai  $R_f$  dapat dicari menggunakan (5). Selanjutnya,  $C_f$  dapat dihitung dengan (6).

$$R_f = \frac{V_{out(maks)} - V_{out(min)}}{I_{pd(maks)}} = \frac{4,1V - 0}{10\mu 0} = 410K\Omega \quad (5)$$

(Standar komersial = 390K $\Omega$ )

$$fp = \frac{1}{2\pi C_f R_f} \quad (6)$$

$$C_f = \frac{1}{2\pi * C_f * f_p} = \frac{1}{2\pi * 390K\Omega * 1MHz} \leq 0,4 pF$$

Diperoleh nilai kapasitor sebesar 0,4 pF. Nilai tersebut sangat kecil sehingga kapasitor dapat ditiadakan dalam rangkaian. Kecuali target *bandwidth* besar, nilai kapasitor diperlukan untuk mereduksi *noise* atau cacat sinyal.

### III. HASIL DAN ANALISIS

#### A. Skenario Pengujian

Pengujian melibatkan alat ukur *Programmable Digital Power supply* HMP3040 HAMEG Instrument sebagai penyedia daya bagi OP-AMP dan *photodiode*, GW INSTEK *Function Generator* GFG8210 sebagai pembangkit sinyal *input*, dan *Oscilloscope* GW INSTEK GDS-1152U untuk melihat respons bentuk sinyal. Selanjutnya, data-data diolah pada Microsoft Excell™.

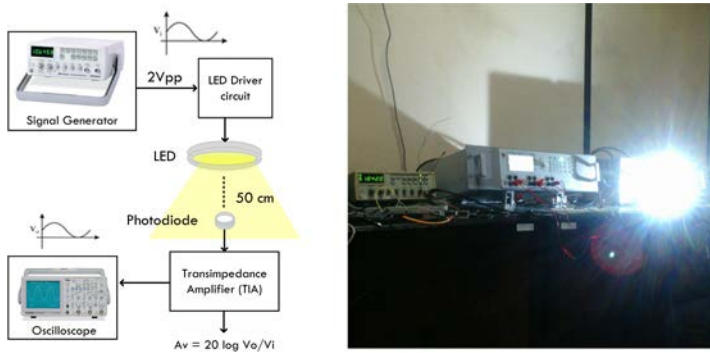
Terdapat tiga pengujian utama, yakni pengujian sinyal kotak, pengujian sinyal sinus, dan pengujian terhadap filter warna. Masing-masing pengujian dengan jarak yang tetap, yakni 50 cm. Jarak tersebut merupakan jarak minimal kanal,

sehingga diperlukan rangkaian penguat (*pre-amp circuit*) untuk dapat dipakai pada aplikasi *indoor*. Pada eksperimen ini tidak dilakukan pengujian terhadap jarak, sudut (*angle*), dan daya *transmitter*.

Sinyal kotak digunakan sebagai representasi dari modulasi digital, yakni PPM, PWM dan OOK. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui frekuensi ideal yang dapat digunakan modulasi digital. Sedangkan sinyal sebagai representasi dari modulasi analog yakni OFDM.

Pengujian respons frekuensi terhadap *voltage gain* dipergunakan untuk mengetahui *bandwidth* dari rangkaian analog yang telah dirancang. *Bandwidth* adalah selisih antara frekuensi tertinggi (maksimum) dengan frekuensi terendah (minimum) dalam rentang tertentu, seperti pada (7).

$$BW = f_{max} - f_{min} \tag{7}$$



Gbr. 8 Skenario pengujian sinyal kotak dan sinus.

Skenario pengujian sinyal kotak dan sinyal sinus ditunjukkan pada Gbr. 8. *Driver LED* pada bagian *transmitter* menerima sinyal gelombang sinus atau kotak dari *signal generator*, kemudian LED memancarkan sinyal informasi yang selaras dengan sinyal *input signal generator* melalui media cahaya. Kemudian sinyal diterima oleh *photodiode* pada bagian *receiver*. Selanjutnya sinyal *output* dari rangkaian TIA ini diukur dan dibandingkan dengan sinyal *input* dari *signal generator* untuk diketahui *gain* yang dapat dihitung dengan (8)

$$A_v = 20 \text{ Log} \frac{V_o}{V_i} \tag{8}$$

Berdasarkan spesifikasi sistem, *input transmitter* diperoleh dari DAC THS 5651EVM dengan *output* maksimal  $2V_{pp}$ . Berdasarkan (8), maka frekuensi *cut-off* ( $f_0$ ) pada  $A_v = -3\text{dB}$  dapat diketahui, yakni saat  $V_o = 1,41 V_{pp}$ . Detail penurunan rumus dijabarkan sebagai berikut,

$$20 \text{ Log} \frac{V_o}{V_i} = -3\text{db}$$

$$\text{Log} \frac{V_o}{V_i} = -\frac{3}{20}$$

$$\text{Log} V_o - \text{Log} 2 = -\frac{3}{20}$$

$$\text{Log} V_o = -\frac{3}{20} + \text{Log} 2$$

$$\text{Log} V_o = 0,151$$

$$V_o = 1,4157$$

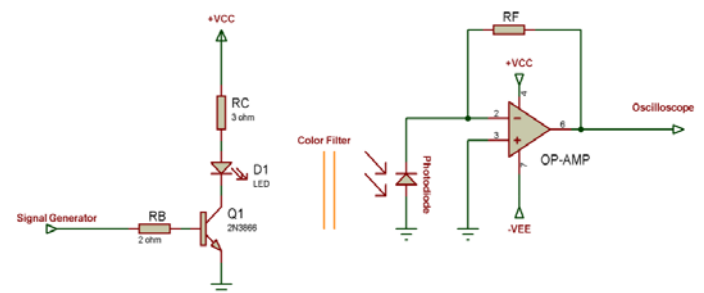
Pengujian selanjutnya adalah filter warna. Digunakan kertas mika sebagai filter. Terdapat lima warna, yakni merah, hijau, biru, kuning, dan putih seperti yang ditunjukkan pada Gbr. 9.



Gbr. 9 Filter warna (*color filter*).

Fungsi dari filter warna adalah untuk mereduksi sinyal interferens yang menjadi *noise* utama dalam sistem komunikasi cahaya tampak (berasal dari sumber cahaya lain). Dengan filter maka akan didapat *Signal Interference Noise Ratio* (SINR) yang tinggi [25]. Selain itu filter dipergunakan untuk aplikasi *multiuser* yang menggunakan RGB LED sehingga *photodiode* dapat mengenali warna masing-masing *channel LED* [2], [26].

Namun, filter warna dapat meredam sinyal yang diterima oleh *receiver*. Oleh karena itu, tujuan dari eksperimen ini adalah untuk mengetahui respons sinyal *output* yang diterima oleh *receiver* terhadap filter warna, yang selanjutnya hasilnya dipergunakan sebagai referensi untuk menggunakan warna filter yang efektif digunakan. Skenario pengujian masih menggunakan konfigurasi pada Gbr. 8, namun pada bagian kanal optik diberikan filter. Detail skenario ditunjukkan pada Gbr. 10. Frekuensi diubah dari *range* tertentu sampai semua filter benar-benar saturasi. Diagram blok pengujian rangkaian pada skenario pengujian filter warna ditunjukkan pada Gbr. 10.



Gbr. 10 Skenario pengujian pengaruh filter warna terhadap unjuk kerja VLC.

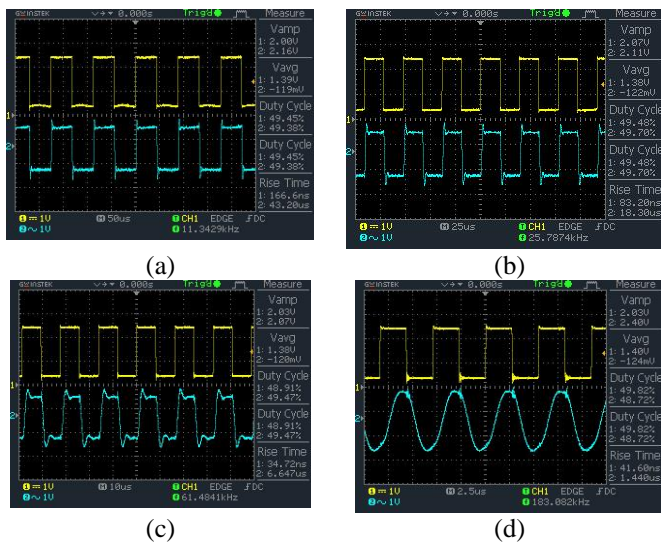
Sinyal yang ditampilkan pada osiloskop terdiri atas dua bagian, yakni *CH1* (warna kuning/bagian atas) sebagai sinyal output *transmitter* dan *CH2* (warna biru/bagian bawah) sebagai sinyal output *receiver*.

**B. Pengujian Sinyal Kotak**

Gbr. 11 merupakan tampilan dari beberapa pengujian dengan frekuensi yang berbeda mulai dari 10 KHz sampai 180 KHz. Dapat disimpulkan bahwa mulai frekuensi 25 KHz, sinyal yang diterima oleh receiver mulai terdistorsi. Bahkan saat frekuensi mencapai 180 KHz, sinyal pada receiver berubah menjadi sinus. Berbeda dengan sinyal sinus, sinyal kotak memiliki *rising time* dan *falling time* yang cepat. Pada sinyal sinus perubahan dari kondisi “1” ke kondisi “0” memiliki *delay* sedangkan pada sinyal kotak tidak terdapat *delay*. Maka dari itu, pada frekuensi 180 KHz, sinyal sudah terdistorsi. Hal ini disebabkan oleh kemampuan yang dimiliki *photodiode* dalam eksperimen ini.

Solusi untuk mengatasi hal demikian adalah dengan mengganti *photodiode* dengan spesifikasi *rising time* dan *falling time* yang kecil, sampai orde *nano second*, sehingga memiliki *sensing* perubahan kondisi tersebut dengan sensitif.

Berdasarkan pengujian ini, frekuensi sinyal PWM, PPM, atau OOK maksimum yang dapat digunakan setidaknya adalah dari frekuensi 1 KHz sampai 10 KHz.



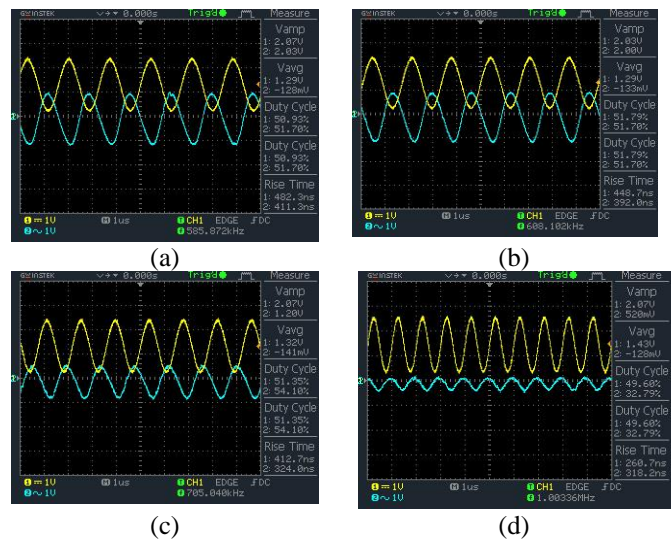
Gbr. 11 Tampilan sinyal kotak pada osiloskop pada frekuensi: (a) 10 KHz; (b) 25 KHz; (c) 50 KHz; dan (d) 180 KHz.

**C. Pengujian Sinyal Sinus**

Pengujian sinyal sinus dilakukan dari mulai frekuensi 200 KHz sampai dengan 1 MHz. Berdasarkan Gbr. 12, pada frekuensi 600 KHz, sinyal *input* sama dengan sinyal *output*, yang artinya belum melemah. Sinyal mulai teredam pada frekuensi 700 KHz.

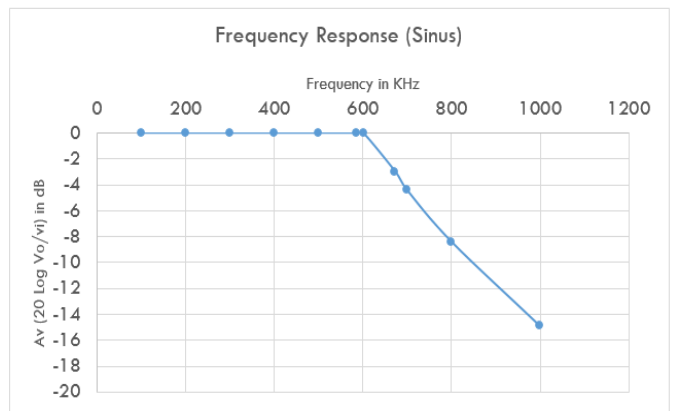
Plot grafik pengukuran ditunjukkan pada Gbr. 13, yang merupakan hubungan antara *gain* tegangan (dB) terhadap frekuensi dalam skala logaritmik. Berdasarkan grafik tersebut, frekuensi *cut-off* (-3dB) dari rangkaian *transceiver* analog ini adalah sekitar 673 KHz.

Pengujian sinyal dengan *single carrier* ini dijadikan referensi dalam mendesain sistem modulasi analog, khususnya OFDM. Kesimpulannya, *bandwidth* maksimum yang dapat digunakan untuk modulasi OFDM adalah dari frekuensi 200 KHz sampai 600 KHz.



Gbr. 12 Tampilan sinyal sinus pada osiloskop pada frekuensi: (a) 585 KHz; (b) 600 KHz; (c) 700 KHz; dan (d) 1 MHz.

Pada eksperimen ini, masih digunakan rangkaian receiver berupa TIA saja. Maka dari itu, agar dapat dipergunakan hingga 1 MHz diperlukan penguat *inverting* untuk membalik sinyal *transmitter* dan receiver sebesar 180°. Pada 1 MHz, sinyal teredam dari 2V<sub>DC</sub> menjadi 0,5V<sub>DC</sub>, sehingga *inverting amplifier* yang didesain harus mampu menguatkan kira-kira empat kali.



Gbr. 13 Grafik penguatan (*gain*) tegangan terhadap frekuensi dalam rentang 0 – 1,2 MHz.

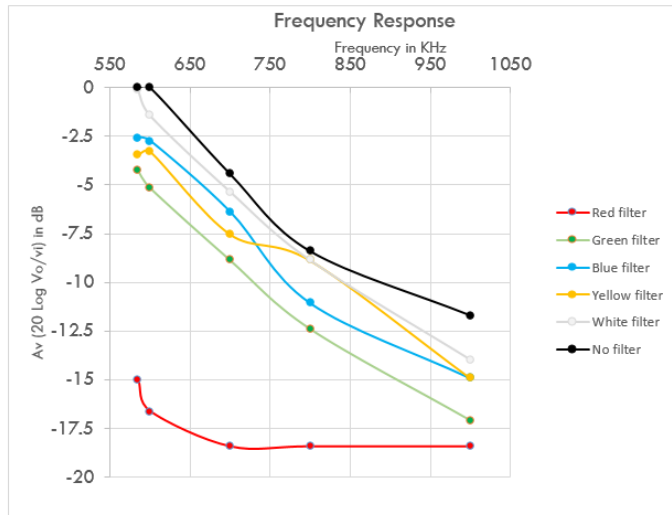
**D. Pengaruh Filter Warna**

Respons terhadap frekuensi dari masing-masing filter warna ditunjukkan pada Gbr. 14. Berdasarkan hasil pengujian, dapat disimpulkan bahwa sinyal teredam tajam dengan filter warna merah dan tidak terlalu teredam pada filter warna putih. Sinyal akan saturasi saat frekuensi di atas 1 MHz. Untuk menguatkan sinyal, rangkaian dapat dihubungkan dengan rangkaian *non-inverting amplifier* dengan penguatan tertentu.

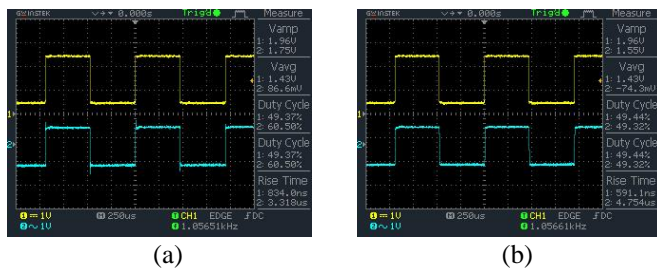
**E. Pengaruh Kapasitor Kompensasi**

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui efek penambahan kapasitor umpan balik (*C<sub>f</sub>*) pada rangkaian TIA. Sinyal yang diterima oleh *photodiode* sangat rentan terhadap

*noise* yang diakibatkan oleh komponen itu sendiri atau faktor lainnya, seperti yang ditunjukkan pada Gbr. 15(a). Kondisi ini menjadikan sinyal *unstable*, yang dapat menyebabkan sinyal informasi cacat. Pada percobaan ini diberikan kompensator berupa kapasitor bernilai 1 pF. Berdasarkan pengujian, *noise* pada TIA dapat direduksi dan sinyal menjadi *stable*, seperti ditunjukkan pada Gbr. 15(b).



Gbr. 14 Grafik perbandingan *gain* tegangan dari masing-masing filter warna dalam rentang frekuensi 550 KHz – 1050 KHz.



Gbr. 15 Pengaruh penambahan kapasitor umpan balik: (a) sinyal belum dikompensasi oleh kapasitor; (b) sinyal sudah dikompensasi.

#### IV. KESIMPULAN DAN SARAN

##### A. Kesimpulan

Sampai pada tahap ini, sinyal informasi yang ditransmisikan terbatas berupa sinyal sinusoidal sebagai representasi modulasi analog, dan sinyal kotak sebagai representasi modulasi digital, yang keduanya dibangkitkan oleh *signal generator*. Pada tahap berikutnya, dipergunakan mikrokontroler dan perangkat pemroses data sebagai perangkat transmisi sinyal informasi. Pengujian dilakukan dengan jarak pakem 50cm yang merupakan jarak minimum dari sistem VLC. Berdasarkan hasil eksperimen, terdapat tiga hasil utama. Dengan input sinyal kotak sebagai representasi modulasi digital PWM, PPM, atau OOK dari *signal generator*, frekuensi maksimum yang dapat digunakan untuk modulasi jenis ini setidaknya adalah dari frekuensi 1 KHz sampai 10 KHz tanpa menggunakan *amplifier*. Untuk sinyal sinus sebagai representasi dari modulasi sinyal analog yakni OFDM,

diperoleh *bandwidth* maksimum yang dapat digunakan untuk modulasi OFDM adalah dari frekuensi 200 KHz sampai 600 KHz, tanpa *amplifier*. Dengan menggunakan lima filter warna yang berbeda, sinyal teredam secara variatif. Sinyal teredam tajam dengan filter warna merah dan tidak terlalu teredam pada filter warna putih. Dapat disimpulkan, filter kompensasi terbukti dapat meredam *noise* pada *amplifier*.

##### B. Saran

Untuk penelitian lanjutan, terdapat tiga bagian yang dapat dioptimasi untuk eksperimen selanjutnya, yakni pada bagian *transmitter* dan bagian *receiver*. Pada bagian *transmitter* diperlukan penambahan rangkaian *offset* untuk mengkondisikan sinyal dalam *range* tegangan kerja LED, dalam hal ini adalah rangkaian *LED driver linear*. Kemudian diperlukan *parallel* LED agar dapat bekerja lebih terang sehingga mampu dipergunakan untuk pengiriman data lebih jauh lagi. Dan terakhir adalah pembuatan modul rangkaian *power supply*. Pada bagian *receiver* diperlukan rangkaian *offset* untuk mengkondisikan amplitud tegangan yang diterima pada rentang tegangan  $0 V_{DC} - 3 V_{DC}$ , sehingga dapat dikenali oleh mikrokontroler sebagai logika “1” atau “0”. Selanjutnya diperlukan rangkaian *pre-amp*, yakni konfigurasi *inverting amplifier* dengan penguatan tertentu, dan terakhir menambahkan rangkaian filter analog untuk mengkompensasi *ambient light*.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didukung oleh “Program Penelitian Unggulan Perguruan Tinggi, Desentralisasi DIKTI 2016” dari KEMENRISTEK – DIKTI, Republik Indonesia.

#### REFERENSI

- [1] A. Nurdiana, Sugito, S. N. Hertiana, “Perancangan dan Analisis Sistem Komunikasi Serat Optik Link Makassar-Maumere Menggunakan DWDM,” *Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknik Informatika (JNTETI)*, Vol. 4(3), Agustus 2015.
- [2] D. Karunatilaka, F. Zafar, V. Kalavally, “LED Based Indoor Visible Light Communications: State of the Art,” *IEEE Communication Surveys & Tutorials*, Vol. 17(3), pp. 1649-1678, 2015.
- [3] A. Ramadhan, L. Lidyawati2, D. Nataliana, “Implementasi Visible Light Communication (VLC) Pada Sistem Komunikasi,” *J. Elkomika*, Vol. 1(1), pp. 13-25, 2013.
- [4] —, “Wireless data from every light bulb,” July 2011. [Online]. Tersedia di [http://www.ted.com/talks/harald\\_haas\\_wireless\\_data\\_from\\_every\\_light\\_bulb](http://www.ted.com/talks/harald_haas_wireless_data_from_every_light_bulb)
- [5] D. Tsonev, S. Videv, H. Haas, “Towards a 100 Gb/s visible light wireless access network,” *Optics Express*, Vol 23 (2), pp. 1627-1637, 2015.
- [6] S.K. Liaw, H.H. Chou, C.J. Wu, M.J. Chien, C. Teng, “500 Mb/s OOK Visible Light Communications using RGB-based LEDs,” *Proc. Int. Symposium on Next-Generation Electronics (ISNE)*, pp. 1-2, May 2015.
- [7] H. Li, X. Chen, B. Huang, D. Tang, H. Chen, “High Bandwidth Visible Light Communications Based on a Post-Equalization Circuit,” *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 26 (2), pp. 119-122, January 2014.
- [8] A. Assabir, J. Elmhamdi, A. Hammouch, A. Akherraz, “Application of Li-Fi Technology in the Transmission of the Sound at the Base of the PWM,” *Proc. of 2nd Int. Conf. on Electrical and Information Technologies (ICEIT)*, 2016.
- [9] A. Pradana, “Rancang Bangun Layer Fisik Komunikasi Cahaya Tampak Berbasis DC-OFDM dan PWM,” Thesis program pascasarjana teknik elektronika ITB 2016. Thesis tidak diterbitkan.
- [10] K. Modepalli, L. Parsa, “Dual-Purpose Offline LED Driver for Illumination and Visible Light Communication,” *IEEE Transactions*



- On Industry Applications*, Vol. 51 (1), pp.406-419, January-February 2015.
- [11] S. Schmid, J. Ziegler, G. Corbellini, T. R. Gross, S. Mangold, "Using consumer led light bulbs for low-cost visible light communication systems. *Proc. of the 1<sup>st</sup> ACM MobiCom Workshop on Visible Light Communication Systems (VLCS)*, pp. 9-14, September 2014.
- [12] A. Ahmed, J. A. Khan, U. Younis, "A High Speed Transmitter for Visible Light Communications upto 50 Mbps," *Int. Conf. on Emerging Technologies (ICET)*, pp. 153-157, December 2014.
- [13] A. Pradana, N. Ahmadi, T. Adiono, "Design and Implementation of Visible Light Communication System Using Pulse Width Modulation," *Proc. of Int. Conf. on Electrical Engineering and Informatic (ICEEI)*, pp. 25-30, Agustus 2015.
- [14] B. Malik and X. Zhang, "Solar Panel Receiver System Implementation for Visible Light Communication," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Electronic, Circuits, and Systems (ICECS)*, pp. 502-503, December 2015.
- [15] W. Song, S. Dong, Z. Jia, "The Design and Realization of APD Receiving Circuit Used in M-ary VLC," *Proc. of IEEE rth Global Conf. on Consumer Electronics (GCCE)*, pp. 543-544, 2015.
- [16] S. Fuada, A. P. Putra, Y. Aska, T. Adiono, "Trans-impedance Amplifier (TIA) Design for Visible Light Communication (VLC) using Commercially Available OP-AMP," *Proc. of 2016 3rd Int. Conf. on Information Tech., Computer, and Electrical Engineering (ICITACEE)*, pp. 31-35, October 2016.
- [17] T. Adiono, R.V.W. Putra, S.Fuada, "Noise and Bandwidth Considerations in Designing Op-Amp Based Transimpedance Amplifier for VLC," unpublished.
- [18] Avago Technologies, "Driving High Power, High Brightness LEDs," Application Note 5310, [Online] Tersedia di <http://www.avagotech.com/docs/AV02-0532EN>
- [19] Datasheet CooChip LED Module, [Online], Tersedia di <http://www.hyrite.com/coochip-led-module-ledmd-w110c.html>.
- [20] E. Lee, J. C. Law, K. Y. Chung, K. Y. Fong, Y. Q. Liew, S. Y. Quan, J. Z. Tuen, C. K. Tan, "Design and Development of A Portable Visible-Light Communication Transceiver for Indoor Wireless Multimedia Broadcasting," *Int. Conf. on Electronic Design (ICED)*, pp. 20-24, August 2014.
- [21] —, "Basic Circuit Building Blocks, [Online], Tersedia di [http://www.opencircuits.com/Basic\\_Circuit\\_Building\\_Blocks](http://www.opencircuits.com/Basic_Circuit_Building_Blocks)
- [22] W. Kester, S. Wurcer, C. Kitchin, [Online], Tersedia di <http://www.analog.com/media/en/training-seminars/design-handbooks/sensor-signal-cond-sect5.PDF>.
- [23] L. Orozco, Programmable-Gain Transimpedance Amplifiers Maximize Dynamic Range in Spectroscopy Systems, Analog Dialoue, Vol. 47, May 2013. [Online] Tersedia di <http://www.analog.com/library/analogdialogue/archives/47-05/pgtia.html>.
- [24] A. Bhat, "Stabilize Your Transimpedance Amplifier," Application Note 5129, February 2012.
- [25] V. N. Tran, J. Hernandez, "Transimpedance Amplifier Design," California Eastern Laboratories, Application Note AN302.
- [26] C.-C. Chang, Y.-J. Su, U. Kurokawa, and B. I. Choi, "Interference rejection using filter-based sensor array in VLC systems," *IEEE Sensors J.*, vol. 12, no. 5, pp. 1025–1032, May 2012.