

## DESAIN DAN IMPLEMENTASI *REAL-TIME VISIBLE LIGHT COMMUNICATION SYSTEMS* BERBASIS BPSK

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

<sup>1</sup>Sekolah Teknik Elektro dan Informatika, Institut Teknologi Bandung;

<sup>2,3,4</sup>University Center of Excellence on Microelectronics, Institut Teknologi Bandung

E-mail: tadiono@stei.itb.ac.id

### ABSTRACT

In previous studies, the author has successfully designed a low-cost VLC system with digital modulation, i.e., signal pulse width modulation (1-PWM) with bit-rate of 3.3 kbps and 2-PWM (6.2 kbps). This research motivation is to increase the data rate of the VLC system by OFDM. The Binary shift-keying modulation (BPSK) modulation was selected as a Mapper (Demodulator). As for the VLC system hardware, the authors utilize previous research. Hence, this research is limited to proof-of-concept (POC) to verify that BPSK modulation is faster than 1-PWM and 2-PWM. The test results show that BPSK modulation has twice transfer rate speed compared to 2-PWM, which is 13.4 kbps. Other tests performed are Bit-Error-Rate (BER) measurement with variations in optical channel distance and reception angle.

**Keywords:** BPSK, OFDM, Visible light communication

### ABSTRAK

Pada penelitian sebelumnya, penulis telah berhasil mendesain sistem *low-cost visible light communication* (VLC) dengan modulasi digital single pulse width modulation (1-PWM) dengan *bitrate* 3,3 kbps dan 2-PWM (6,2 kbps). Motivasi dari penelitian ini adalah meningkatkan laju data dengan menggunakan OFDM. Modulasi *binary shift-keying modulation* (BPSK) dipilih sebagai *Mapper*. Adapun *hardware* sistem VLC, penulis memanfaatkan penelitian yang sebelumnya sehingga penelitian ini sebatas *proof-of-concept* (POC) untuk membuktikan bahwa modulasi BPSK lebih cepat daripada 1-PWM dan 2-PWM. Hasil pengujian menunjukkan bahwa modulasi BPSK memiliki kecepatan dua kali lipat dibandingkan 2-PWM, yakni 13.4 kbps. Pengujian lain yang dilakukan adalah pengukuran *Bit-error-rate* (BER) dengan variasi jarak kanal optik dan sudut penerimaan.

**Kata Kunci:** BPSK, Komunikasi cahaya tampak, OFDM

### PENDAHULUAN

VLC merupakan salah satu alternatif komunikasi nirkabel yang menggunakan cahaya tampak dengan panjang gelombang 380 nm s.d. 780 nm sebagai medium komunikasi [1]. Dalam beberapa tahun terakhir, topik VLC telah menarik perhatian banyak peneliti di seluruh dunia seiring dengan perkembangan teknologi LED [2]. Kemutakhiran teknologi LED memungkinkan alat penerangan ini memiliki efisiensi energi yang lebih baik, memiliki *lifespan* lebih lama dibandingkan alat penerangan konvensional (lampu pijar/neon) [3] dan juga lebih murah dari sisi harga. Selain itu, LED juga dapat dikendalikan dengan kecepatan tinggi hingga 10 MHz sehingga memungkinkan untuk dapat dimanfaatkan sebagai *antenna* pada

komunikasi jarak terbatas, yakni VLC. Dengan keterbatasan cakupan area LED, maka VLC disinyalir lebih aman (*secure*) dari penyadap dibandingkan komunikasi radio. Selain itu, VLC menjamin lebih aman dari gangguan elektromagnetik dan resiko kanker [4].

Sistem VLC dapat diplikasikan pada lingkungan dalam ruang, seperti perkantoran, rumah hunian, area bebas *electromagnetic interference* (EMI) seperti rumah sakit, ataupun area-area yang diharuskan untuk mampu menyediakan banyak koneksi bagi sejumlah besar pengguna serta perangkat secara simultan seperti *convention center* & tempat publik. Pada penelitian sebelumnya, penulis telah berhasil mewujudkan sistem VLC berbasis modulasi digital 1-PWM untuk aplikasi *indoor* yang mampu menyediakan interkoneksi *point-to-point* dan berhasil mendemonstrasikan

*streaming* teks dengan kecepatan maksimum 3,3 kbps [5].

Penulis meninjau bahwa keterbatasan kecepatan transfer data disebabkan oleh dua hal, yakni faktor penggunaan modulasi dan pemilihan komponen-komponen untuk *hardware* sistem VLC. Penelitian lanjutan telah berhasil membuktikan bahwa peningkatan modulasi (menggunakan 2-PWM) dapat mempercepat laju data (*data rate*) sebesar dua kali lipat, yakni 6,2 kbps [6]. Variasi PWM seperti 3-PWM atau 4-PWM sebagai pembawa data tidak mudah dilakukan, sehingga upaya lain untuk meningkatkan laju data adalah memanfaatkan modulasi *multi-carrier*.

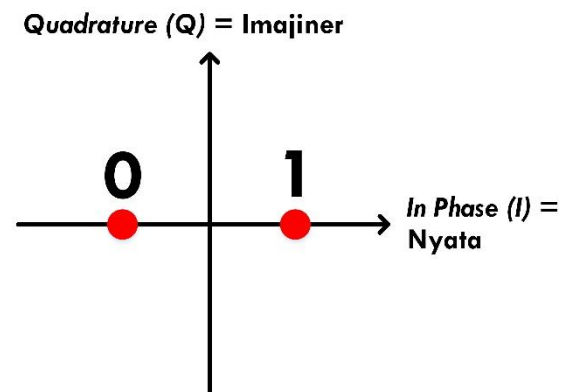
Salah satu teknik *multiplexing* yang saat ini populer digunakan untuk aplikasi akses komunikasi cepat berbasis cahaya tampak adalah *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM). Meskipun lebih kompleks dibandingkan modulasi berbasis *Pulse Time Modulation* (PTM) seperti PWM dan PPM, teknik OFDM disinyalir dapat lebih menghemat *bandwidth* komunikasi karena membagi *bandwidth* lebar menjadi spektrum yang sempit (*sub-carrier*) dan saling *overlap*. Sebagai akibat, transfer data akan lebih cepat dibandingkan PTM.

OFDM adalah skema transmisi data yang mampu menghasilkan transfer data kecepatan tinggi dengan memanfaatkan *sub-carrier* yang saling *orthogonal*. OFDM merupakan metode *encoding* data digital pada frekuensi *multi-carrier*. OFDM telah lama diterapkan pada teknologi komunikasi nirkabel berbasis radio seperti *Wireless Fidelity* (Wi-Fi) dan *4G Long Term Evolution* (LTE). Umumnya, *output* dari modulator OFDM adalah bilangan kompleks sehingga ketika diterapkan pada sistem VLC, modulasi *quadrature* (yakni BPSK, QPSK, QAM-16, QAM-32) tidaklah memungkinkan. VLC menggunakan teknik *intensity modulation direct detection* (IM/DD), maka informasi fasa negatif tidak dapat ditransmisikan oleh LED yang mengakibatkan sinyal yang diterima oleh *photodiode* ada yang terpotong. Dengan demikian, sistem OFDM yang banyak digunakan pada sistem komunikasi radio harus dimodifikasi.

*Phase shift keying* (PSK) adalah skema *mapper-demapper* pada sistem OFDM. Prinsip kerja pada bagian *mapper* OFDM adalah melewati data dengan mengubah-ubah fase dari sinyal referensi (sinyal pembawa). PSK

menggunakan fase sejumlah bilangan terhitung, masing-masing menempatkan pola unik dari digit biner. Biasanya, masing-masing fase mengkodekan sejumlah bit. Masing-masing pola bit-bit membentuk simbol yang direpresentasikan dengan fase tertentu. Sedangkan pada sisi *demapper* didesain untuk dapat menentukan fase sinyal yang diterima dan memetakan balik ke bentuk simbol yang asli, sehingga data asli dapat diperoleh kembali [7].

*Binary Phase Shift Keying* (BPSK) adalah bentuk paling sederhana dari PSK yang menggunakan dua fasa yang terpisah sejauh  $180^\circ$ . Lokasi titik dalam diagram konstelasi bebas dengan syarat kedua titik terpisah sejauh  $180^\circ$ . Ilustrasi *mapper* BPSK ditunjukkan pada Gambar 1 dimana titik-titik tersebut terletak pada sumbu *real*, pada  $0^\circ$  dan  $180^\circ$ . Pada modulasi BPSK, sinyal direpresentasikan dalam dua kemungkinan. Sinyal 1 direpresentasikan dengan memberikan pergeseran fasa sinyal *carrier* sebesar  $0^\circ$ . Sedangkan sinyal 0 direpresentasikan dengan menggeser fasa sinyal *carrier* sebesar  $180^\circ$  [8].



Gambar 1. Diagram konstelasi untuk modulasi BPSK *gray-coded*, direproduksi dari [8]

Astharini, dkk mendesain beberapa modulasi PSK (salah satunya adalah BPSK) untuk sistem optik [9], namun hanya terbatas pada simulasi Matlab sehingga tidak *real-time*. Simulasi BPSK juga dilakukan oleh Malik, dkk [10] dan Sonmez & Akbal [11] pada *Field Programmable-Gate Array* (FPGA) untuk aplikasi generik. Selanjutnya Suresh, dkk merealisasikan *hardware* untuk membangkitkan sinyal BPSK [12], namun sisi aplikasinya tidak didiskusikan. Sementara pada penelitian ini, penulis mendesain modulasi BPSK sampai tahap *proof-of-concept* pada sistem *point-to-point* VLC. Disamping itu, sistem VLC

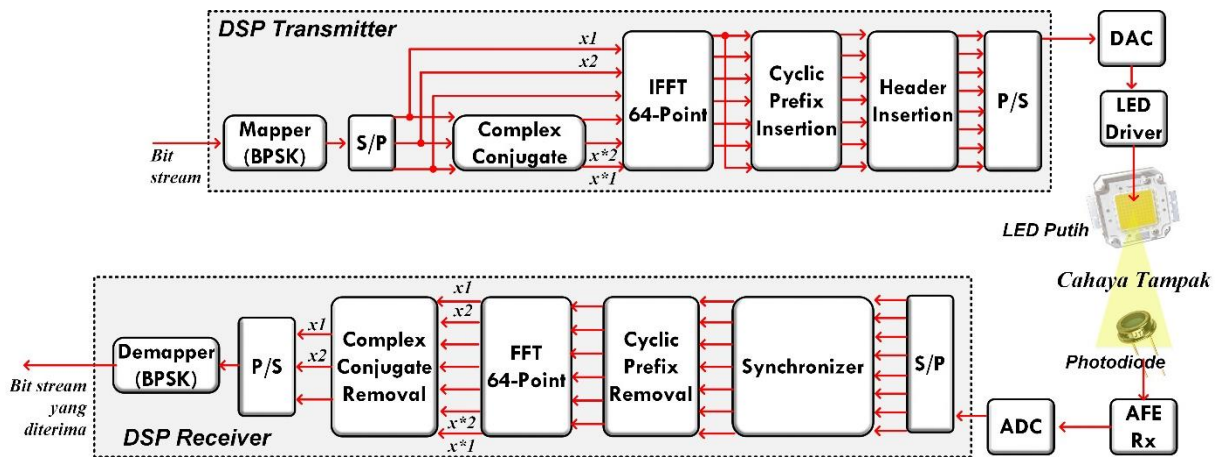
didesain agar mampu diakses secara *real-time* sehingga data yang dikirim oleh *transmitter* akan ditampilkan oleh *receiver*.

Kekurangan dari modulasi BPSK adalah hanya mampu memodulasikan 1 bit per simbol. Sehingga jika dibandingkan *mapper* yang lain seperti QPSK dan QAM, laju data BPSK lebih rendah namun memiliki potensi nilai BER yang lebih kecil. Karena tujuan penelitian adalah sebagai *Proof-of-concept* modulasi BPSK pada sistem VLC, maka pada penelitian ini penulis memanfaatkan *hardware* rangkaian AFE *transceiver* dari [13]. Adapun *bandwidth* rangkaian AFE adalah maksimum 50 kHz. Maka dari itu, hipotesis dari penelitian ini adalah laju data dari sistem VLC berbasis

OFDM dengan *mapper* BPSK tetap lebih cepat dari modulasi 1-PWM dan 2-PWM namun tidak signifikan.

### METODE

Penelitian diawali mendesain blok diagram sistem OFDM (Gambar 2) yang terdiri atas blok *transmitter* dan blok *receiver*. Bagian blok yang berada di dalam kotak garis putus-putus diimplementasikan pada modul mikrokontroler STM32F4. Sistem VLC dalam penelitian ini adalah satu arah (*Downlink*).



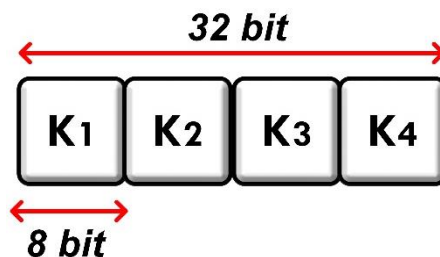
Gambar 2 Blok diagram DSP *transceiver* untuk OFDM

Desain blok DSP *transceiver* yang telah dirancang, selanjutnya akan diuji fungsionalitasnya menggunakan program simulasi Matlab sebelum diaplikasikan pada mikrokontroler.

Aliran *bit stream* diterima modul mikrokontroler dari komputer melalui UART. Data ini berupa karakter dalam format ASCII 8 bit. Data *bit stream* dimasukkan ke *mapper* (modulator) untuk dipetakan kedalam simbol-simbol. Modulator yang digunakan dalam penelitian ini adalah BPSK. Pada *mapper* BPSK, satu simbol membawa 1 bit data. Format data satu *frame* simbol dari sinyal OFDM ditunjukkan pada diagram pada Gambar 3. BPSK membawa 32-bit atau 4 karakter ASCII 8 per *framenya* (satu periode sinyal OFDM).

Keluaran dari *mapper* ini masih berupa data serial sehingga diperlukan *serial to parallel* (S/P) agar data terkumpul menjadi satu *frame*. Blok S/P mengumpulkan data 32 simbol

setiap satu periode. Sebanyak 32 data simbol dalam satu *frame* ini dimasukkan pada blok IFFT 64-point.



Gambar 3. Data payload untuk modulasi BPSK

Diagram blok OFDM pada Gambar 2 mampu digunakan untuk *mapper* selain BPSK, yakni QPSK dan QAM. Meskipun keluaran dari *mapper* BPSK adalah bilangan *real*, penulis memasukkan blok penghitung *complex conjugate* dan dihubungkan ke *output* blok S/P. Fungsi blok *complex conjugate* adalah untuk

mengkondisikan agar keluaran dari blok IFFT merupakan bilangan *real*. Hasil penghitungan *complex conjugate* ini dihubungkan pada 32 *point* IFFT lainnya.

Keluaran dari IFFT adalah sinyal OFDM dalam domain waktu yang diumpkan sebagai masukan pada blok *cyclic prefix insertion* yang merupakan duplikasi sinyal bagian depan (*prefix*) dan diletakkan dibelakang sinyal (*cyclic*). Hal ini diperlukan untuk mengatasi *inter symbol interference* (ISI) antar simbol OFDM. Penambahan *cyclic prefix* pada sinyal juga tidak akan merubah data yang dibawa sinyal OFDM karena *cyclic prefix* adalah pengulangan sinyal dalam domain waktu. *Cyclic prefix* yang dirancang dalam OFDM ini adalah pengulangan 8 titik *prefix*

Blok selanjutnya adalah penambahan *header* pada sinyal OFDM dibagian depan yang merupakan suatu sinyal referensi yang telah diketahui pada bagian *transmitter* dan *receiver*. Selain itu, digunakan sebagai sinkronisasi pada bagian *receiver* untuk mendeteksi awal sinyal OFDM sebelum sinyal dimasukkan pada blok FFT di *receiver*. Panjang *header* adalah 15 *point*. Proses sinkronisasi sangat diperlukan untuk menghindari efek ISI. Blok berikutnya adalah *Guard interval* (GI) pada bagian akhir sinyal yang berfungsi sebagai jeda pemisah antar simbol OFDM.

Selanjutnya deretan angka ini dimasukkan pada blok *Digital-to-Analog Converter* (DAC). Penulis menggunakan DAC *built in* yang ada pada modul STM32F4 *Discovery Board*, dengan kecepatan *sampling* maksimum 1 Msps. Kecepatan transfer data yang ingin dicapai dalam desain ini adalah 10 kbps dengan menggunakan modulasi BPSK. Jumlah titik *sample* satu simbol OFDM adalah sebanyak 64 titik. Perhitungan periode 1 simbol OFDM ditunjukkan pada Persamaan (1) dan perhitungan *sampling* dari DAC ditunjukkan pada persamaan (2). Diketahui kecepatan transfer data dengan modulasi BPSK adalah 10 kbps dan satu *frame* sinyal membawa 64 bit data. Didapatkan 50  $\mu$ s per-*sampling*

$$\text{Periode 1 simbol} = \frac{64 \text{ bit}}{10 \text{ kbps}} = 6,4 \text{ ms} \quad (1)$$

$$\text{Periode sampling DAC} = \frac{6,4 \text{ ms}}{128 \text{ sampling}} = 50 \mu\text{s /sampling} \quad (2)$$

*Output* dari DAC adalah sinyal analog dengan rentang tegangan 0–3.3V dan dimasukkan ke LED *driver* yang berfungsi untuk mengendalikan level iluminasi LED. LED *driver* yang digunakan untuk mentransmisikan sinyal OFDM adalah LED *driver* linier dimana level iluminasi LED akan sebanding dengan besarnya tegangan [14-17].

Sinyal OFDM merambat di ruang bebas menggunakan medium cahaya tampak. Pada sisi *receiver*, PIN *photodiode* menangkap cahaya dan membangkitkan sinyal listrik yang proporsional terhadap cahaya yang diterima. Rangkaian AFE *receiver* bertugas untuk mengkondisikan dan mengkompensasi sinyal yang telah tercampur *noise* selama merambat pada ruang bebas sehingga dapat diolah dengan benar oleh blok DSP *receiver*.

Sinyal analog keluaran Mikrokontroler harus dikonversi menjadi digital kembali oleh *Analog-to-Digital Converter* (ADC). Pengaturan kecepatan *sampling* ADC ditunjukkan pada Persamaan (3).

$$\text{ADC Periode sampling} = \text{DAC periode sampling} \quad (3)$$

Blok DSP pada *receiver* yang pertama yaitu blok S/P. Blok berikutnya adalah *header detector* untuk proses sinkronisasi *time base* antara *transmitter* dan *receiver*. Blok ini berfungsi untuk mendeteksi bagian awal dari sinyal OFDM. Suatu sinyal referensi telah ditambahkan oleh *transmitter* pada setiap *frame* sinyal OFDM untuk menandai bagian awalnya. Sinyal referensi yang ditambahkan oleh *transmitter* ini telah diketahui oleh *receiver*. Metode pendeteksian *header* ini menggunakan teknik korelasi silang (*cross correlation*) antara sinyal referensi yang telah disimpan dalam memori mikrokontroler terhadap sinyal OFDM yang telah di-*sampling*.

Selanjutnya Hasil operasi korelasi silang akan menghasilkan koefisien korelasi yang bernilai maksimum apabila sinyal referensi yang disimpan oleh *receiver* bertemu dan berhimpit dengan sinyal referensi yang ada di dalam sinyal *frame* OFDM. Dengan demikian, *time offset* dapat ditentukan dan bagian awal sinyal dapat diketahui. Apabila *header* telah terdeteksi, maka *header* selanjutnya dibuang dan dimasukkan pada *cyclic prefix remover*.

Blok *Cyclic prefix remover* bertugas untuk menghilangkan *cyclic prefix* yang telah

ditambahkan oleh *transmitter*. *Cyclic prefix* bertugas untuk mengkompensasi adanya *error time offset* yang berpotensi menyebabkan terjadinya ISI.

Blok DSP berikutnya adalah modul *FFT 64-point*. Sinyal informasi yang berada di dalam domain waktu ini harus dikembalikan ke bentuk semula yaitu dalam domain frekuensi. *FFT* bertugas untuk mentransformasikan sinyal dalam domain waktu ke dalam domain frekuensi. Namun *output* dari sinyal informasi yang *valid* hanyalah 32 *point* pertama saja karena 32 *point* sisanya merupakan hasil pencerminan dari 32 *point* pertama. Maka dari itu, data simbol 32 *point* dalam bentuk *complex conjugate* ini dihilangkan oleh blok *complex conjugate remover* karena tidak diperlukan.

Proses selanjutnya adalah rangkaian bilangan *output* dari *complex conjugate remover* dimasukkan pada blok P/S sehingga demodulator dapat memproses rangkaian bilangan ini satu per satu atau secara serial. Simbol-simbol yang telah diterima ini harus dikembalikan ke dalam data biner oleh demodulator dalam hal ini adalah BPSK. Metode yang digunakan pada proses demodulasi ini adalah *hard decision* dimana simbol diterjemahkan ke dalam data biner

berdasarkan jarak terdekat dengan titik-titik referensi dalam diagram konstelasi.

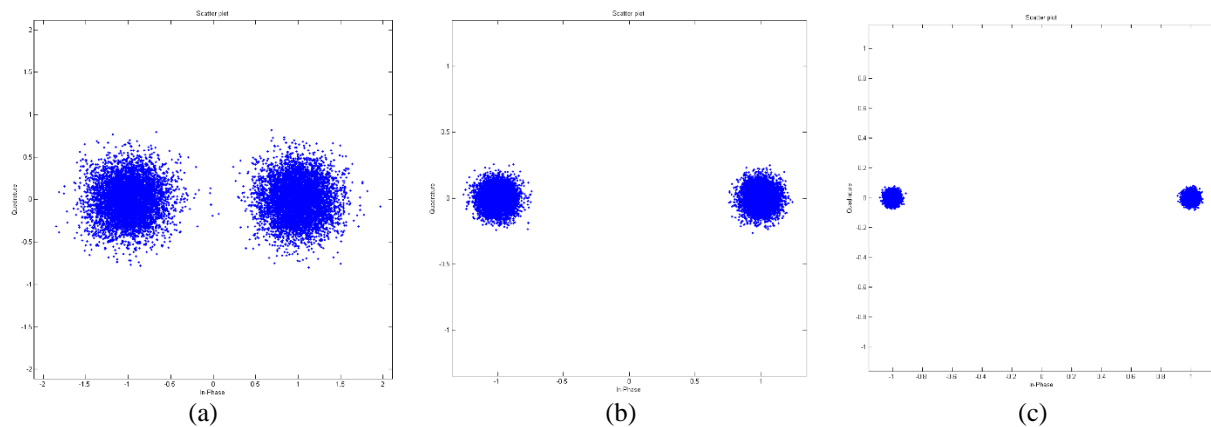
Spesifikasi *AFE transmitter* dan *AFE receiver* ditampilkan pada Tabel 1 [7].

Tabel 1. Spesifikasi *AFE transceiver*

Parameter	Nilai
Tegangan <i>input</i> LED driver linier	0 s.d. 3,3 V
<i>Bandwidth</i> maksimum rangkaian <i>AFE transmitter</i>	50 kHz
Daya LED	9 W
Tegangan kerja LED	10 s.d. 14 V
Warna LED	Putih
Respon spektrum <i>Photodiode</i>	400 s.d. 1000 nm
<i>Photodiode</i>	PIN <i>Photodiode</i> SP8-ML
Tegangan <i>output</i> rangkaian <i>AFE receiver</i>	0 s.d. 3,3 V

## HASIL DAN ANALISA

Gambar 4 merupakan hasil simulasi Matlab dengan tiga nilai SNR yang berbeda dimana model kanal yang digunakan adalah *Additive white Gaussian noise* (AWGN) [18]. Berdasarkan hasil simulasi dapat disimpulkan bahwa semakin rendah SNR, maka titik-titik konstelasi semakin tersebar satu sama lain sehingga berpotensi besar untuk terjadinya *error* pada data yang terima.



Gambar 4. Hasil simulasi yang menunjukkan diagram konstelasi data pada *output* DSP receiver dengan *mapper* BPSK untuk: (a) SNR = 10; (b) SNR = 20; (c) SNR = 30

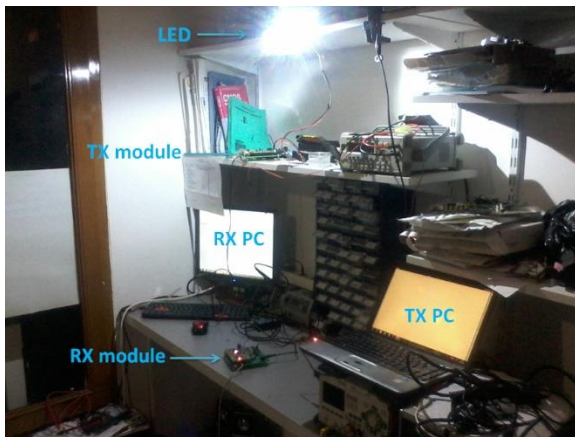
Data keluaran dari *FFT* yang berupa simbol-simbol, selanjutnya dimasukkan pada demodulator (*demapper*). Keluaran dari *demapper* BPSK adalah data biner. Data ini dibandingkan dengan data yang dikirimkan oleh *transmitter* sehingga *error* dapat dihitung.

Setelah proses integrasi DSP dan *AFE transceiver* dilakukan, langkah selanjutnya

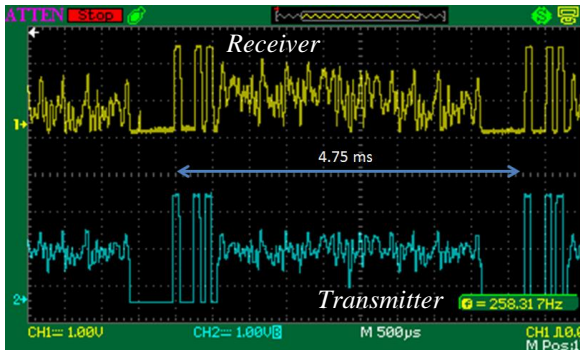
adalah mendemonstrasikan pengiriman sinyal OFDM melalui kanal cahaya tampak. Gambar 5 merupakan *setup* eksperimen yang dilakukan yang terdiri atas *VLC transmitter* (*Tx Module*) dan *VLC receiver*, osiloskop (*Rx module*), dan dua buah komputer yakni *Rx PC* dan *Tx PC*.

Sinyal satu simbol OFDM dalam domain waktu ditunjukkan pada Gambar 6.

Satu simbol sinyal OFDM terdiri dari *header*, *payload*, dan *guard interval*. Sinyal bagian bawah (warna biru) adalah sinyal *input* pada *transmitter*, sedangkan sinyal bagian atas (warna kuning) adalah sinyal *output* pada *receiver*. Satu simbol sinyal OFDM memiliki durasi 4,75 ms. Jumlah bit *payload* data untuk BPSK adalah 64 bit, Perhitungan kecepatan data transfer yang diperoleh untuk BPSK ditunjukkan pada Persamaan (4) dan didapatkan 13,4 kbps.



Gambar 5. Skenario pengujian sistem VLC



Gambar 6. Hasil tangkapan osiloskop dari sinyal satu simbol OFDM

Tabel 2 merupakan perbandingan kecepatan transfer data sistem VLC dengan modulasi OFDM-BPSK dengan modulasi lainnya pada skenario dan *hardware* yang sama. Laju data dari OFDM dengan *mapper* BPSK lebih cepat daripada 1-PWM maupun 2-PWM.

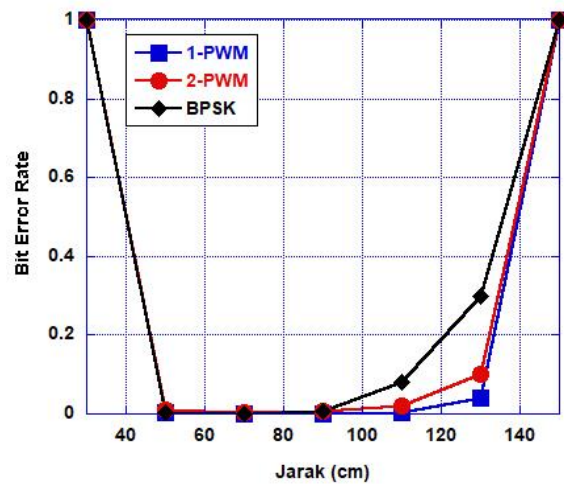
$$\text{Laju data (BPSK)} = 4.75 \text{ ms} \times 64 \quad (4)$$

Referensi	Jenis modulasi	Laju data
[5], [19]	1-PWM	3,3 kbps
[6]	2-PWM	6,2 kbps
Penelitian ini	OFDM-BPSK	13,4 kbps

Pengujian selanjutnya adalah mengukur nilai BER pada sistem VLC terhadap jarak kanal optic dan perubahan sudut orientasi penerimaan. BER merupakan perbandingan jumlah data *error* yang diterima oleh rangkaian AFE *receiver* terhadap keseluruhan data yang dikirim oleh *transmitter*. Adapun metode pengukuran BER mengacu pada penelitian sebelumnya [19].

Skenario pengujian pertama adalah pengukuran BER terhadap jarak LED-*Photodiode*. Dalam skenario ini, transmisi data dari komputer pengirim (*Tx PC*) ke komputer penerima (*Rx PC*) dilakukan untuk beberapa jarak yang berbeda yaitu sekitar 30 s.d. 150 cm. Data dalam bentuk teks sebanyak 10 kb ditransfer dari *Tx PC* ke *Rx PC* melalui medium cahaya tampak. Sudut penerimaan *Photodiode* terhadap LED dibuat tetap yaitu 0 derajat dalam konfigurasi *Line-of-Sight* (LoS).

Hasil pengukuran BER untuk beberapa jarak LED-*Photodiode* ditunjukkan pada Gambar 7. Skenario pengujian sama seperti [5], [6]. Nilai BER pada sistem VLC dengan modulasi BPSK lebih besar dibandingkan dengan modulasi 1-PWM dan 2-PWM.

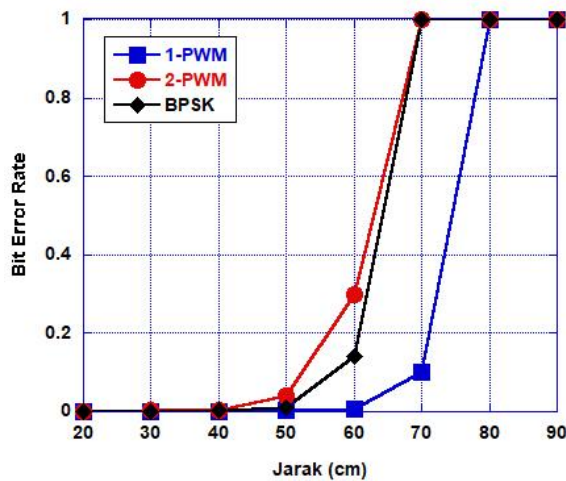


Gambar 7. BER vs jarak LED-*Photodiode* dengan *setting* gain A pada modulasi BPSK, 1-PWM dan 2-PWM

Untuk jarak yang terlalu dekat yaitu <50 cm, nilai BER terlalu besar karena sinyal mengalami saturasi akibat intensitas cahaya yang diterima terlalu kuat. Sebaliknya apabila jarak lebih dari 90 cm, maka nilai BER juga besar karena intensitas cahaya yang diterima *Photodiode* terlalu lemah [20]. Sehingga sistem VLC ini efektif digunakan dalam jarak antara

50 s.d 90 cm. Dari grafik dapat diamati bahwa meskipun laju data modulasi BPSK lebih cepat dibandingkan 1-PWM dan 2-PWM, nilai BER relatif membesar terutama pada jarak kanal optik diatas 90 cm.

Selanjutnya, dilakukan pengukuran BER dengan *setting* gain yang lebih rendah dari pada *setting* gain A agar sinyal yang diterima *receiver* pada jarak dekat (dibawah 50 cm) tidak mengalami saturasi. Blok *Preamplifier* pada AFE *receiver* dalam *setting* gain B dibuat 1x. Hasil pengujian ditunjukkan pada Gambar 8. Dengan *setting* gain B, maka rentang jarak efektif untuk komunikasi VLC menjadi 20 s.d. 50 cm.



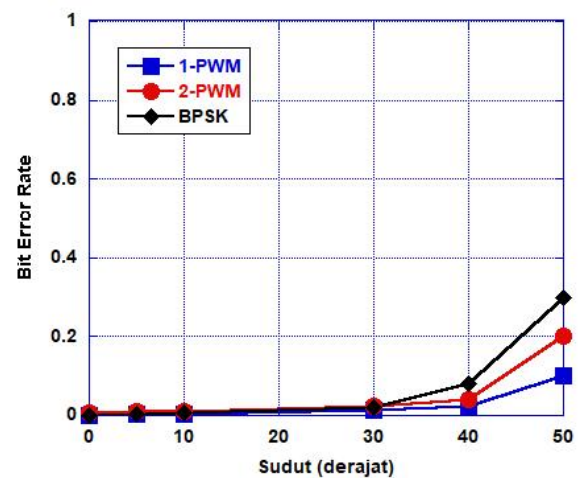
Gambar 8 BER vs jarak LED-Photodiode dengan *setting* gain B pada modulasi BPSK, 1-PWM dan 2-PWM

Dengan mengurangi gain pada *Preamplifier*, maka nilai BER modulasi BPSK lebih baik dari pada 2-PWM. Secara keseluruhan komunikasi VLC tetap dapat dilakukan dengan baik tidak seperti pada *setting* gain A. Rentang jarak mobilitas sistem VLC dengan modulasi BPSK berkisar 40 cm.

Skenario pengujian kedua adalah pengukuran BER terhadap sudut penerimaan *Photodiode*. Pada skenario ini, pengaturan gain B digunakan sebagai parameter. Kemudian jarak kanal optik dibuat tetap namun sudut

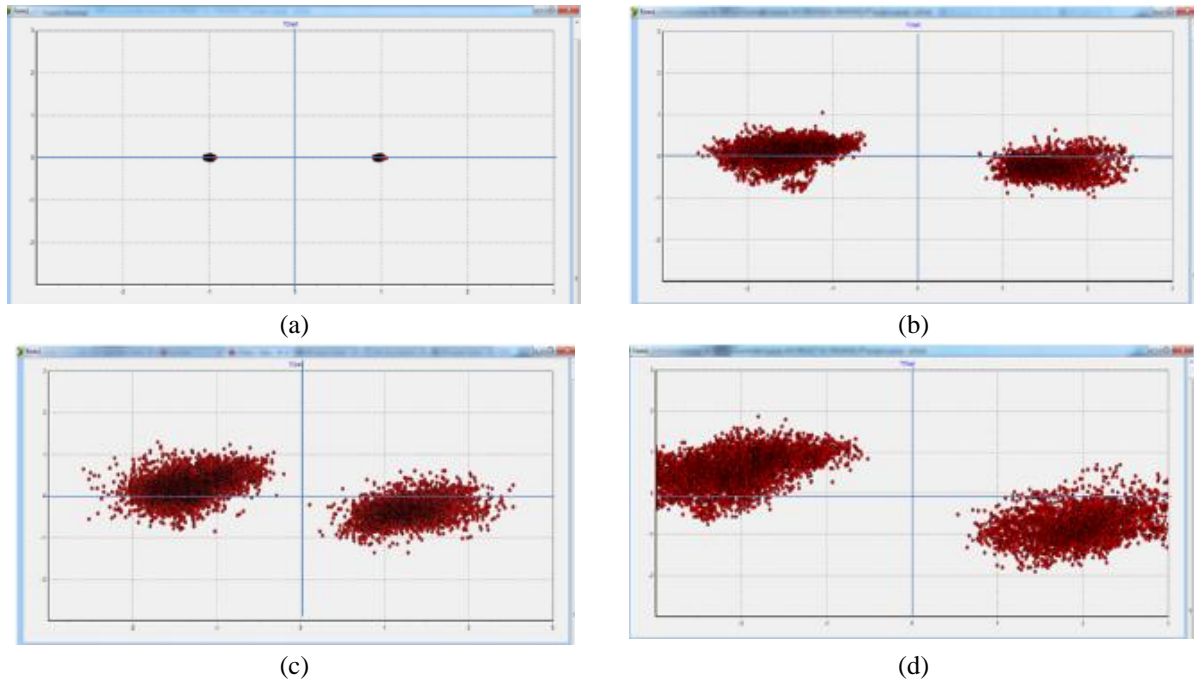
penerimaan sebagai variabel yakni diatur dalam rentang antara 0 s.d. 50 derajat. Hasil pengukuran BER ditunjukkan pada Gambar 9. Sama halnya dengan skenario pertama, penulis membandingkan modulasi BPSK terhadap 1-PWM dan 2-PWM.

Ketiga jenis modulasi yang digunakan menunjukkan tren hasil yang sama yaitu semakin lebar sudut penerimaan *Photodiode* terhadap LED maka nilai BER semakin besar. Berdasarkan grafik pengukuran disimpulkan bahwa sudut penerimaan efektif dari *Photodiode* adalah 0 s.d. 30 derajat.



Gambar 9. BER vs sudut penerimaan dengan *setting* gain B pada modulasi BPSK, 1-PWM dan 2-PWM

Gambar 10 merupakan hasil plot diagram konstelasi OFDM-BPSK yang diproses secara *real-time*. Plot ditampilkan pada Rx PC melalui GUI yang dibuat menggunakan DELPHI 7.0. Sistem VLC diujikan pada jarak yang berbeda-beda. Berdasarkan hasil plot konstelasi dapat disimpulkan bahwa semakin jauh jarak optik, maka nilai SNR & *Error Vector Magnitude* (EVM) semakin rendah sehingga titik-titik konstelasi semakin tersebar atau potensi *error* data diterima semakin besar.



Gambar 10. Diagram konstelasi modulasi BPSK untuk jarak: (a) 50 cm, (b) 75 cm, (c) 100 cm, dan (d) 130 cm

## KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini mengimplementasikan teknik OFDM dengan *mapper* BPSK untuk sistem VLC Sistem komunikasi data nirkabel berbasis cahaya tampak secara *real-time* telah berhasil didemonstrasikan dimana kecepatan transfer data OFDM-BPSK adalah 13,4 kbps, atau kurang lebih dua kali lipat dari modulasi 2-PWM dan empat kali lipat dari 1-PWM. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa nilai BER pada modulasi BPSK cenderung lebih besar daripada modulasi 1-PWM dan 2-PWM meskipun *setting gain* diubah-ubah.

Keterbatasan kecepatan transfer disebabkan oleh komponen elektronik pada AFE yang memiliki *bandwidth* rendah dan keterbatasan dalam pemrosesan digital pada mikrokontroler.

Untuk meningkatkan laju data maka disarankan untuk 1) menggunakan komponen AFE dengan spesifikasi *high-end*, 2) diperlukan teknik modulasi yang membawa lebih banyak dari dua bit (misalnya QPSK, QAM-16, QAM-64 atau teknik lain), dan 3) pemilihan prosesor DSP yang lebih cepat yang dalam hal ini, FPGA dapat menggantikan peran *generic microcontroller*.

Pada penelitian lanjutan, penulis akan memfokuskan untuk menambahkan kanal untuk

*uplink* dengan medium inframerah dan meninjau pengaruh rangkaian filter pada modulasi BPSK dibandingkan dengan modulasi 1-PWM dan 2-PWM.

## UCAPAN TERIMAKASIH

Penelitian ini dibiayai oleh dana Hibah Penelitian dari KEMRISTEK-DIKTI melalui skema Kerjasama Luar Negeri (KLN) kolaborasi dengan *Pukyong National University-Korea Selatan*, judul proyek penelitian “*Machine to machine communication (M2M) based on visible light communication (VLC)*” (No. Kontrak: 009/SP2H/LT/DRPM/IV/2017).

## REFERENCES

- [1] T. Adiono, S. Fuada, and S. Harimurti, “Bandwidth Budget Analysis for Visible Light Communication Systems utilizing Commercially Available Components,” *Proc. of the 10<sup>th</sup> Int. Conf. on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, pp. 1375-1380, December 2017.
- [2] S. Fuada and T. Adiono, “Visible Light Communication Kits for Educations,” *J. of Education and Training*, Vol. 5(2), pp. 39-49, May 2018. DOI: 10.5296/jet.v5i2.12578.
- [3] A. Burton, H.L. Minh, N. Aslam, and T.D. Nguyen, “LED based lighting and



- communications: An emerging technology for a greener more sustainable future,” *EAI Endorsed Transactions on Energy Web*, Vol. 4(13), pp. 1-6, 2017.
- [4] D. Karunatilaka, F. Zafar, V. Kalavally, and R. Parthiban, “LED based Indoor Visible Light Communications: State of the Art,” *IEEE Communication Survey & Tutorials*, Vol. 17(3), pp. 1649-1678, 2015.
- [5] T. Adiono, S. Fuada, and A. Pradana, “Desain dan Realisasi Sistem Komunikasi Cahaya Tampak untuk Streaming Teks berbasis PWM,” *J. Setrum*, Vol. 6(2), pp. 270-279, Desember 2017.
- [6] T. Adiono, A. Pradana, and S. Fuada “Rancang Bangun Sistem Komunikasi Cahaya Tampak dengan Modulasi 2-PWM berbasis Mikrokontroler,” *Jurnal SISFO*, 2018.
- [7] A. Pradana, “Rancang bangun layer fisik komunikasi cahaya tampak berbasis DC-OFDM dan PWM,” M.T. thesis, Dept. Elect. Eng., School of Electrical Engineering and Informatics, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia, 2016.
- [8] T. Adiono, A. Pradana, and S. Fuada, “A Low-complexity of VLC System using BPSK,” *Int. J. of Recent Contributions from Engineering, Science and IT (IJES)*, Vol. 6(1), pp. 99-106, 2018.
- [9] D. Astharini, A. Mayola, O.N. Samijayani, and A. Syahriar, “Analisa Kinerja Teknik Modulasi Digital pada Kanal Optik Nirkabel,” *J. Elektronika dan Telekomunikasi (JET)*, Vol. 17(1), pp. 7-12, August 2017.
- [10] H. Malik, D.R. Rotake, and M. Mahajan, “Design and Implementation of BPSK Modulator and Demodulator using VHDL,” *IOSR J. of Electronics and Communication Engineering*, Vol. 9(3), pp. 98-105, 2014.
- [11] M. Sonmez and A. Akbal, “FPGA Based, Low Cost Modulators of BPSK and BFSK, Design and Comparison of Bit Error Rate over AWGN Channel,” *GU J Sci*, Vol. 26(2), pp. 207-213, 2013.
- [12] D.S. Suresh, R. Sekar, S. Tejaswini, and B.M. Ankitha, “Realization of Digital Modulation Techniques using TMS320C6748,” *Proc. of Int. Conf. on Power, Control, Signals, and Instrumentation Engineering (ICPCSI)*, pp. 1576-1580, 2017.
- [13] T. Adiono, S. Fuada, and A. Pradana, “A Circuit for Robust Visible Light Communication Systems in Indoor Environment,” *Proc. of the Int. Conf. on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE)*, July 2018.
- [14] S. Fuada, T. Adiono, A. P. Putra, and Y. Aska, “A Low-cost Analog Front-End (AFE) Transmitter Designs for OFDM Visible Light Communications,” *Proc. of the IEEE Int. Symposium on Electronics and Smart Devices (ISESD)*, pp. 371-375, October 2016. DOI: [10.1109/ISESD.2016.7886750](https://doi.org/10.1109/ISESD.2016.7886750).
- [15] S. Fuada, T. Adiono, A.P. Putra, Y. Aska, “LED Driver Design for Indoor Lighting and Low-rate Data Transmission Purpose,” *Optik-Int. J. for Light and Electron Optics*, Vol. 156, pp. 847-856, 2018, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2017.11.180>.
- [16] S. Fuada, “Design and Implementation of Analog Front-End Transceiver Module for Visible Light Communication System,” M.T. thesis, Dept. Elect. Eng., School of Electrical Engineering and Informatics, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia, 2017.
- [17] T. Adiono and S. Fuada, “Desain dan Implementasi LED Driver Linier untuk Aplikasi Visible Light Communication,” *Unpublished*.
- [18] T. Adiono, Y. Aska, S. Fuada, and A.A. Purwita, “Design of an OFDM System for VLC with a Viterbi Decoder,” *IEIE Transaction on Smart Processing and Computing (SPC)*, Vol. 6(6), pp. 455-465, December 2017. DOI: <https://doi.org/10.5573/IEIESPC.2017.6.6.455>.
- [19] A. Pradana, S. Fuada, and T. Adiono, “Desain dan Implementasi Sistem Visible Light Communication berbasis Pulse Width Modulation,” *Majalah Ilmiah Teknologi Elektro*, Vol. 17(2), pp. 237-243, 2018.
- [20] S. Fuada, A.P. Putra, and T. Adiono, “Analysis of Received Power Characteristics of Commercial Photodiodes in Indoor LoS Channel Visible Light Communication,” *Int. J. of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)*, Vol. 8(7), pp. 164-172, July 2017. DOI: [10.14569/IJACSA.2017.080722](https://doi.org/10.14569/IJACSA.2017.080722).