

## PERANCANGAN DAN SIMULASI ACO OFDM UNTUK *VISIBLE LIGHT COMMUNICATION*

### *DESIGN AND SIMULATION ACO OFDM FOR VISIBLE LIGHT COMMUNICATION*

Nur Fahmi Farabi<sup>1</sup>, Ir Akhmad Hambali, M.T.<sup>2</sup>, Denny Darlis S.Si., M.T.<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>Prodi S1 Teknik Telekomunikasi, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom

<sup>3</sup>Prodi D3 Teknik Telekomunikasi, Fakultas Ilmu Terapan, Universitas Telkom

<sup>1</sup>[nurfahmifrabi@student.](mailto:nurfahmifrabi@student.), <sup>2</sup>[ahambali@](mailto:ahambali@), <sup>3</sup>[dennydarlis@telkomuniversity.ac.id](mailto:dennydarlis@telkomuniversity.ac.id)

#### Abstrak

*Visible Light Communication (VLC)* merupakan sistem komunikasi menggunakan cahaya tampak sebagai sinyal pembawanya, VLC merupakan alternatif yang cukup baik dalam melayani kebutuhan data, disaat alokasi spektrum frekuensi radio yang sudah sangat padat digunakan. *Orthogonal Frequency Divison Multiplexing (OFDM)* merupakan teknik transmisi data dengan memanfaatkan sifat ortogonalitas sinyal. OFDM banyak digunakan pada sistem komunikasi *broadband wireless* dan *wireline* karena ketahanannya terhadap interferensi antar symbol (ISI). Pada tugas akhir ini disimulasikan sistem komunikasi cahaya tampak menggunakan teknik *Asymmetrically Clipped Optical (ACO) OFDM* yang memungkinkan efisiensi daya optik dan memberikan *data rate* yang tinggi. Berdasarkan hasil simulasi, untuk mendapatkan target SNR > 10 dB. *Transmitter LED* dengan sudut 50°, 60° dapat mencapai target dengan level daya 6.5 dan 7 watt untuk jarak terjauh. Pada target BER 10<sup>-3</sup> rasio SNR yang dibutuhkan 4, 16, 64 dan 256 QAM berturut-turut sebesar 10 dB, 17 dB, 23 dB dan 29 dB.

Kata kunci : VLC, *Asymmetrically Clipped Optical*, OFDM, BER

#### Abstract

*Visible Light Communication (VLC)* is a communication system using visible light as a signal carrier, VLC is a fairly good alternative in serving data needs, when the allocation of radio frequency spectrum that is already very dense is used. *Orthogonal Frequency Divison Multiplexing (OFDM)* is a data transmission technique utilizing signal orthogonality. OFDM is widely used in wireless broadband communication systems and wireline because of its resistance to inter-symbol interference (ISI). In this final project simulated visible light communication systems using the *Asymmetrically Clipped Optical (ACO) OFDM* technique enable optical power efficiency and provide high data rates. To get expected SNR target which is > 10 dB. LED transmitter with semi-angle 50°, 60° can reach these targets with power requirements at the level of 6.5 and 7 watt for the longest distance. When BER 10<sup>-3</sup> the signal ratio required by 4, 16, 64 and 256 QAM is 10 dB, 17 dB, 23 dB and 29 dB respectively

Keywords: VLC, *Asymmetrically Clipped Optical*, OFDM, BER

#### 1. Pendahuluan

Dewasa ini kebutuhan masyarakat akan pengiriman informasi dengan kecepatan tinggi semakin meningkat, untuk melayani kebutuhan itu teknologi nirkabel pun semakin banyak dikembangkan. Namun hal ini tidak berbanding lurus dengan ketersediaan spektrum frekuensi radio yang sangatlah terbatas, yang mayoritas penggunaannya untuk komunikasi *wireless*. Salah satu alternatif yang dapat digunakan untuk melayani kebutuhan data secara nirkabel adalah dengan menggunakan komunikasi cahaya tampak. *Visible Light Communication* merupakan salah satu pengembangan teknologi *Optical Wireless Communication (OWC)* yang dalam penerapannya, informasi dikirimkan secara nirkabel dengan memanfaatkan cahaya tampak untuk penerangan sebagai sinyal *carrier*-nya. Hal ini memiliki kelebihan seperti efisien penggunaan lampu LED untuk penerangan, tidak memerlukan regulasi terkait frekuensi optik namun memiliki jarak jangkauan yang terbatas.

Ketika OFDM digunakan pada sistem komunikasi *wireless*, sinyal kompleks *baseband* OFDM digunakan untuk dimodulasi dengan amplitude dan fasa pada frekuensi radio pembawanya (*carrier*). Berbeda dengan penggunaan OFDM pada serat fiber optik dan *Intensity Modulated and Direct Detection (IM/DD)*, sinyal *baseband*  $x(t)$  dimodulasi dengan menggunakan intensitas frekuensi optik *carrier*-nya bukan amplitude dan fasa. Ini mengartikan  $x(t)$  harus bernilai *real* dan positif. Dalam OFDM IM/DD sistem, sinyal *real* OFDM dapat dihasilkan dengan membatasi *input*-an vektor pada *transmitter* IFFT untuk mendapatkan *Hermitian Symmetry*. Sedangkan sinyal dapat dibuat positif dengan menambahkan arus DC-biased (DCO) atau dengan memotong (*clipping*) sinyal pada domain *nol* (ACO) dan hanya mengirimkan sinyal positif sebagai ACO-OFDM.

Pada Tugas Akhir ini akan disimulasikan model sistem komunikasi cahaya tampak dengan menggunakan ACO-OFDM sebagai teknik modulasinya. Pemodelan VLC disimulasikan dengan keadaan didalam ruangan (*indoor*) dengan kondisi *ideal*. Tingkat konstelasi dibuat variatif dari 4 QAM sampai 256 QAM, dari simulasi tersebut selanjutnya dievaluasi nilai SNR dan BER yang didapatkan.

## 2. Dasar Teori

### 2.1 Visible Light Communication (VLC)

Komunikasi cahaya tampak adalah sebuah system komunikasi yang memanfaatkan cahaya tampak sebagai sinyal pembawanya dengan udara bebas sebagai media transmisinya. Cahaya tampak sendiri merupakan cahaya yang dapat terlihat secara kasat mata, yaitu cahaya yang memiliki panjang gelombang 400-700nm atau memiliki rentang frekuensi 420 – 750 THz. Penggunaan cahaya tampak sebagai media transmisi komunikasi memberikan beberapa keuntungan, diantaranya memiliki tingkat keamanan yang tinggi karena apa yang dilihat ialah yang dikirim, tidak berbahaya bagi kesehatan karena tidak menimbulkan radiasi, ketersediaan spektrum frekuensi yang masih luas dalam penggunaan frekuensi optik serta penggunaan lampu LED sebagai media komunikasi bukan hanya media penerangan. Dibalik itu, kekurangan VLC ialah jarak cakupan yang terbatas dan kemungkinan interferensi dari cahaya lain yang cukup menjadi tantangan.

### 2.2 Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)

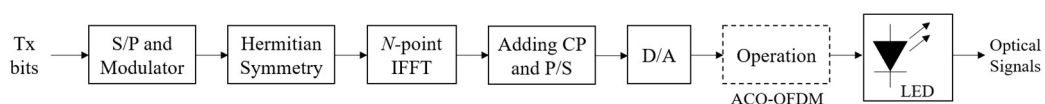
OFDM adalah teknik transmisi *multi-carrier* digital yang mendistribusikan secara digital simbol yang dikodekan pada beberapa frekuensi sub-carrier dengan maksud mereduksi laju waktu simbol agar mencapai kehandalan melawan pantulan panjang dalam kanal radio lintasan jamak, bahkan bila spektral sub-carrier saling tumpang tindih, informasi secara sempurna dapat diterima tanpa interferensi antar sub-carrier sehingga secara keseluruhan (dalam satu simbol) dapat digunakan lebar pita kecil. OFDM banyak digunakan pada sistem komunikasi *broadband* dan *wireless communication* karena ketahanannya terhadap interferensi antar symbol (ISI). OFDM juga merupakan teknik modulasi yang baik untuk sistem komunikasi optik, karena OFDM memiliki penggunaan daya yang lebih efisien dibanding skema teknik modulasi konvensional seperti *on-off-keying* (OOK). Dalam penerapannya, OFDM mentransmisikan sinyal yang bersifat bipolar dan kompleks, tetapi sinyal bipolar tidak bisa ditransmisikan dalam intensitas modulasi pada komunikasi *wireless* optik, karena intensitas cahaya tidak bisa negatif. Oleh karena itu, ada beberapa metode yang dapat digunakan untuk menciptakan sinyal keluaran pada OFDM untuk dapat bersifat *unipolar*, jadi hanya sinyal bersifat positif saja yang ditransmisikan. Diantaranya, *DC-biased Optical* (DCO) dan *Asymmetrically Clipped Optical* (ACO).

#### 2.2.1 ACO-OFDM

Dalam *Asymmetrically Clipped Optical* (ACO)-OFDM, sinyal yang ditransmisikan dibuat positif, dengan cara memotong sinyal original OFDM *bipolar* pada nilai 0 (nol) tanpa menambahkan arus DC dan hanya mentransmisikan sinyal bagian positif.

$$x(t) = \begin{cases} x_0(t) & \text{if } x_0 \geq 0 \\ 0 & \text{if } x_0 \leq 0 \end{cases} \quad (2.1)$$

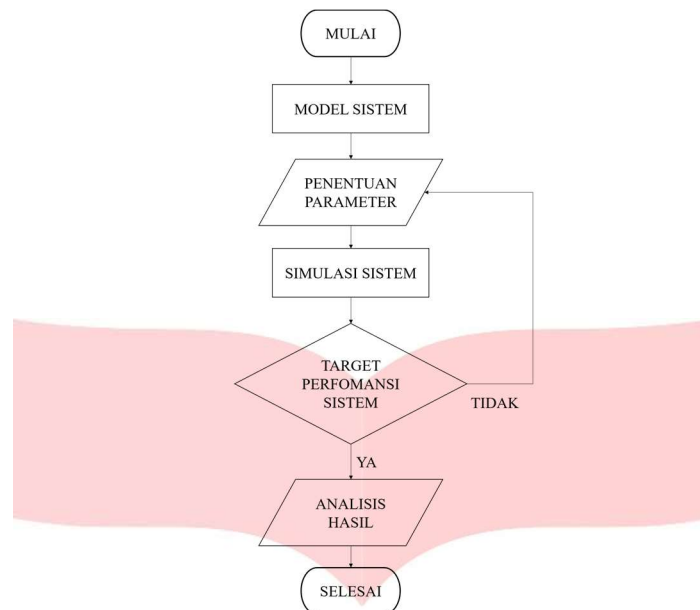
Dimana  $x_0(t)$  adalah sinyal OFDM yang belum terpotong (*unclipped*). Pada gambar 2.1 dapat terlihat blok diagram transmitter pada ACO-OFDM untuk *transmitter* VLC. Data awal diubah terlebih dahulu dari serial menjadi paralel dan kemudian di modulasi oleh QAM namun *subcarrier* ganjil saja yang digunakan untuk membawa data kompleks yang dipetakan oleh QAM. Setelah dilakukan pemotongan (*clipping*) didapatkan konstelasi vektor yang telah memperoleh *Hermittian Symmetry*. Untuk mencapai bentuk gelombang output *real*, ACO-OFDM dapat mengadopsi dengan membatasi input-an pada IFFT.



Gambar 2. 1 Blok diagram transmitter ACO-OFDM

## 2.3 Perencanaan dan Simulasi Sistem

Pada gambar 2.2 dapat terlihat tahapan-tahapan yang dilakukan dalam pengerjaan Tugas Akhir ini.



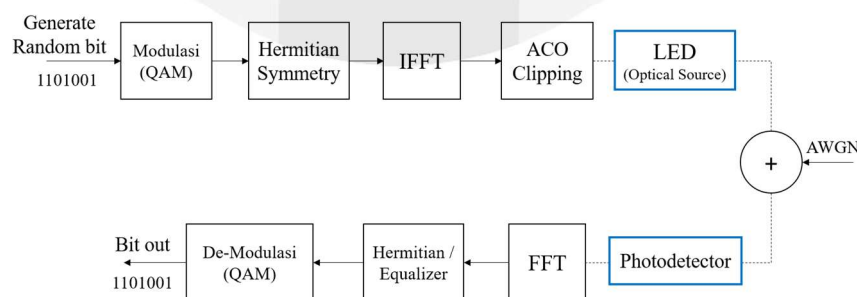
Gambar 2. 2 Diagram alir penelitian

Tugas akhir ini dikerjakan dalam beberapa tahap diantaranya, pertama dengan menentukan model sistem yang akan dirancang pada penelitian ini. Sistem model yang akan dirancang meliputi sistem VLC dan sistem ACO OFDM. Langkah kedua yaitu menentukan parameter-parameter yang akan digunakan pada kedua sistem tersebut. Pada sistem VLC terdapat parameter-parameter yang akan digunakan seperti dimensi ruangan, jarak pengirim-penerima, daya pancar LED, besaran sudut serta responsivitas *photodetector*. Sedangkan pada sistem ACO OFDM terdapat parameter seperti jumlah *subcarriers*, panjang I/FFT dan format konstelasi modulasi QAM. Langkah selanjutnya dengan melakukan simulasi sistem dengan menggunakan perangkat lunak Matlab R2018a, simulasi dilakukan dengan memodelkan parameter yang telah ditentukan kedalam *syntax* program.

Parameter kualitas yang ditargetkan pada penelitian ini adalah tingkat kesalah penerjemahan bit / BER sebesar  $10^{-3}$ . Jika sistem memenuhi target tersebut maka sistem dapat dikatakan baik. Selanjutnya dapat dilakukan analisis dari hasil simulasi yang didapatkan. Kemudian dapat dilakukan penarikan kesimpulan serta saran yang disampaikan dalam pelaporan pada tahapan akhir penelitian.

### 2.3.1 Model Sistem

Blok diagram sistem ACO OFDM untuk komunikasi cahaya tampak yg disimulasikan pada penelitian ini terlihat pada gambar 2.3. Secara garis besar, sistem, terdiri dari 3 bagian yaitu, *transmitter*, *receiver* dan model kanal. Proses *clipping* pada ACO OFDM terdapat pada sinyal setelah blok IFFT.



Gambar 2. 3 Blok diagram ACO OFDM untuk VLC

Bagian awal dimulai dengan input-an data berupa *random* bit, selanjutnya terdapat blok modulasi dimana format yang digunakan pada penelitian ini berupa QAM. Selanjutnya terdapat blok *hermitian symmetry* yang bertujuan untuk membatasi jumlah input an pada IFFT, hal ini digunakan untuk membuat sinyal keluaran memiliki nilai *real*. Setelah terdapat blok *clipping* dimana prose pemotongan sinyal negatif terjadi disini, hal ini digunakan untuk membuat keluaran sinyal bersifat unipolar / hanya bagian positif saja. Pada blok *transmitter* untuk VLC terdapat LED sebagai sumber optik nya, besaran daya pancar dan nilai sudut pancara akan berpengaruh terhadap kinerja sistem komunikasi cahaya tampak itu sendiri.

### 2.3.2 Penentuan Parameter

Parameter simulasi yang digunakan pada penelitian ini dapat terlihat pada Tabel 2.1. Pada parameter ini diasumsikan bahwa sistem berada pada kondisi ruangan yang ideal, dimana tidak ada sumber cahaya lain yang dapat menyebabkan interferensi / *noise*. Lampu LED terdapat pada posisi atas dengan kondisi menempel dengan atap ruangan yang memiliki ketinggian 3 meter. Sedangkan posisi receiver dianalogikakan berada di atas meja dengan ketinggian sebesar 0.85 meter diatas permukaan lantai.

Tabel 2. 1 Parameter Simulasi

Bagian	Parameter	Nilai
Karakteristik VLC	Dimensi Ruang	5x5x3 m
	Posisi <i>transmitter</i>	3 m diatas lantai
	Jumlah lampu LED	1
	Model Kanal	LOS
<i>Transmitter</i>	$P_{Tx}$	1 – 20W
	Sudut pancar Tx	50°, 60°
<i>Receiver</i>	Responsivitas Photodetector	0.85 A/W
	FOV Rx	60°
	Luas permukaan PD	1 cm <sup>2</sup>
	Index refractive con	1.5
OFDM	Jumlah <i>subcarriers</i>	256
	Jumlah simbol untuk I/FFT	128
	Modulasi	4, 16, 64, 256 QAM

Setelah dilakukan pemodelan sistem dan penentuan paramter, untuk langkah selanjutnya dapat dilakukan simulasi sistem dengan menggunakan skema yang ada. Pada penelitian ini terdapat dua skema yang akan di simulasikan, skema tersebut dapat dilihat detail pada sub bab dibawah ini. Hasil pengujian yang dilakukan pada skema satu selanjutnya dapat dijadikan sebagai acuan untuk pengujian yang akan dilakuka pada skema dua.

### 2.3.3 Skenario Penelitian

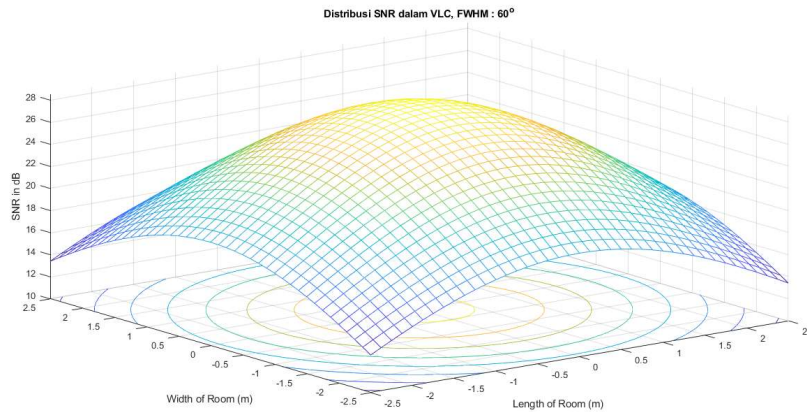
Skenario yang pertama yaitu dengan mensimulasikan sistem VLC dengan variasi besaran sudut pancar pada LED yang digunakan, yaitu 50° dan 60°. Setelah itu dilakuka perubahan terhadap daya yang ada pada LED mulai dari 1 watt sampai dengan 20 watt. Pada hasil simulasi akan dilakukan pengambilan data berupa nilai SNR pada jarak terdekat dan terjauh antara sumber dengan penerima.

Skenario yang kedua yaitu dengan mensimulasikan sistem ACO OFDM dengan mengubah besaran konstelasi M-QAM, dengan format berupa 4-QAM, 16-QAM, 64-QAM dan 256-QAM. Setelah itu dilakukan perubahan juga terhadap rasio SNR yang ada, mulai dari 1 dB sampai dengan 30 dB dengan kenaikan atau spasi sebesar 1 dB. Hasil simulasi pada skenario kedua ini selanjutnya dilakukan analisis untuk membuktikan bahwa kesalahan penerjemahan bit /*bit error rate* dapat terjadi karena faktor SNR dan jumlah konstelasi.

## 3. Analisis Simulasi Sistem

### 3.1 Analisis Hasil Simulasi Skenario I

Distribusi pencahayaan untuk satu pemancar LED dengan daya sebesar 1 watt dan sudut pancaran sebesar 60° ditunjukkan pada gambar 3.1. Dapat terlihat pancaran cahaya LED untuk bidang penerima pada kanal LOS terdistribusi secara seragam.

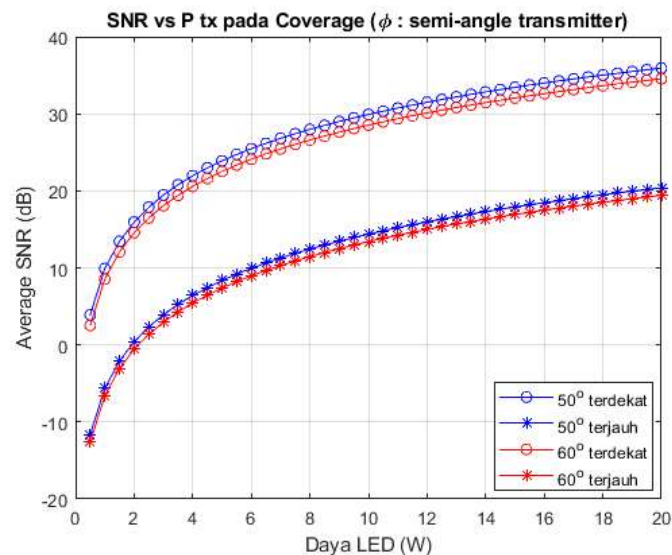


Gambar 3. 1 Distribusi cahaya pada sudut  $60^\circ$

Nilai minimum dan maksimum rasio SNR yang diterima berturut-turut adalah sebesar 13.4 dB dan 28.53 dB, dengan nilai rata-rata distribusi pancaran sebesar 22.02 dB. Dimana nilai maksimum merupakan besaran daya yang diterima pada area pusat pancaran, dengan jarak terdekat antara *transmitter* dan *receiver*. Nilai minimum merupakan besaran daya yang diterima pada area terluar pancaran dengan jarak terjauh dari sumber cahaya. Ada lebih dari 41 dB selisih daya dari titik terdekat sampai titik terjauh. Perbedaan daya optik antara level daya terendah dan daya maksimum ini menandakan ada beberapa titik / area mendapatkan SNR dengan rasio tinggi dan beberapa area lainnya yang mendapatkan intensitas SNR dengan rasio kecil.

### 3.1.1 SNR vs Daya Transit LED

Nilai besaran *signal to noise ratio* (SNR) dengan berbagai variasi daya pancar pada LED terlihat pada gambar 3.4. Skema yang dilakukan pada sistem ini dengan menggunakan satu lampu LED sebagai sumber dengan format sudut pancaran *transmitter* sebesar  $50^\circ$  dan  $60^\circ$ . Daya yang digunakan pada LED sebesar 1 watt sampai dengan 20 watt, lalu dilakukan pengambilan data pada jarak terjauh dan terdekat antara sumber dengan penerima.



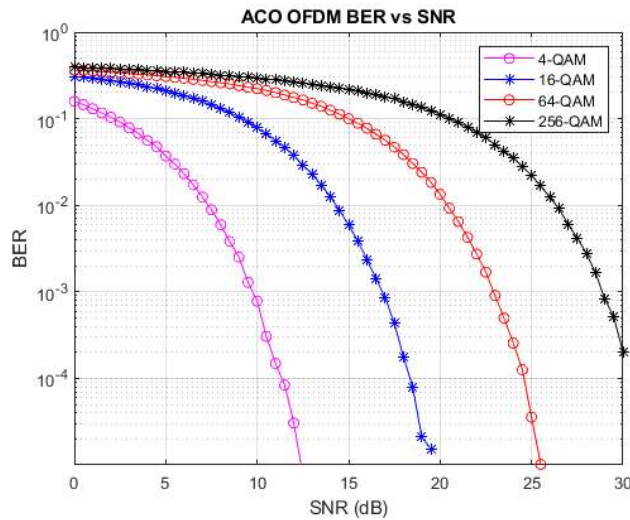
Gambar 3. 2 Nilai SNR pada Daya pancar LED

Jarak terdekat antara sumber ke penerima adalah 3 meter dengan kondisi penerima berada tepat dibawah sumber cahaya, sedangkan jarak terjauh antara sumber dengan penerima adalah 4.63 meter dengan kondisi penerima berada pada sudut-sudut ruangan. Berdasarkan grafik diatas dapat kita lihat bahwa besaran nilai SNR dipengaruhi oleh besaran daya yang ada pada pemancar, dengan hubungan kedua nilai tersebut berbanding lurus. Dimana semakin besar daya LED maka semakin besar pula besaran nilai SNR yang didapatkan. Namun hal ini tidak demikian dengan besarnya sudut pancaran *transmitter*. Semakin besar sudut pancaran maka rata-rata SNR yang didapatkan semakin kecil, hubungan kedua nilai tersebut berbanding terbalik. Mengingat tujuan dari penerapannya teknologi VLC ini adalah untuk pengefisien-an lampu LED sebagai media penerangan dan juga komunikasi, maka kedua hal tersebut merupakan salah satu tantangan dalam penerapannya.

Besaran SNR dengan daya LED 1 – 20 watt pada sudut *transmitter* 50° dan 60° secara berturut-turut adalah. Pada sudut 50° dengan jarak terdekat, nilai minimum SNR sebesar 3.8 dB dan nilai maksimum SNR sebesar 35.93 dB. Pada sudut yang sama dengan jarak terjauh, nilai minimum SNR sebesar -11.63 dB dan nilai maksimum SNR sebesar 20.4 dB. Sedangkat pada sudut 60° dengan jarak terdekat, nilai minimum SNR sebesar 2.51 dB dan nilai maksimum SNR sebesar 34.77 dB. Pada sudut yang sama dengan jarak terjauh, nilai minimum SNR sebesar -12.61 dB dan nilai maksimum SNR sebesar 19.4 dB.

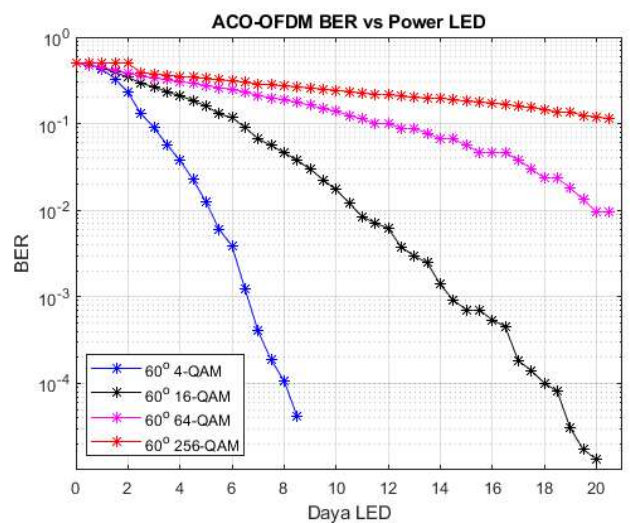
**3.2 Analisis Hasil Simulasi Skenario II**

Pada gambar 3.5 dapat terlihat grafik yang menunjukkan perbandingan rata-rata nilai BER dengan rasio daya SNR untuk pemodelan sistem ACO OFDM. Skema yang dilakukan pada simulasi ini dengan menggunakan jumlah *subcarriers* sebanyak 256, dengan skenario format konstelasi terdiri dari 4-QAM, 16-QAM, 64-QAM dan 256-QAM.



Gambar 3. 3 BER vs SNR pada ACO OFDM

Pada BER 10<sup>-3</sup> M= 4, 16, 64 dan 256 QAM membutuhkan rasio SNR secara berturut-turut sebesar 10 dB, 17 dB, 23 dB dan 29 dB. Skema ACO-OFDM dengan 4-QAM menunjukkan peromansi terbaik dengan rasio SNR lebih rendah dapat mendapatkan target BER yang sama dengan format konstelasi lainnya pada rasio SNR yang lebih besar. Gambar 3.6 menunjukkan perbandingan BER dengan daya pada LED untuk jarak terjauh antara *transmitter* dengan *receiver* dengan besara sudut pada *transmitter* 60°.



Gambar 3. 6 BER vs Daya pada jarak terjauh

Pada target BER sebesar  $10^{-3}$ , format 4-QAM dapat memenuhi target tersebut pada daya LED sebesar  $> 6.5$  watt, format 16-QAM dapat memenuhi target yang sama pada daya LED sebesar 14.5 watt, untuk format 64-QAM dan 256-QAM untuk level daya pada 20 Watt belum mampu memenuhi target BER yang sama.

## 4. Penutup

### 4.1 Kesimpulan

1. Distribusi SNR untuk VLC, semakin besar daya pada LED maka berbanding lurus dengan nilai SNR-nya. Berbanding terbalik dengan besaran sudut *transmitter*, semakin besar sudut maka nilai rata-rata SNR yang didapatkan semakin kecil
2. Pada target SNR  $> 10$  dB, *transmitter* dengan sudut  $50^\circ$  dapat mencapai target tersebut pada level daya 6.5 watt untuk jarak terjauh dan 1.5 watt untuk jarak terdekat. Pada sudut  $60^\circ$  dapat mencapai target yang sama pada daya 7 watt untuk jarak terjauh dan 1.5 watt untuk jarak terdekat.
3. Skema ACO OFDM dengan format konstelasi berupa 4, 16, 64 dan 256 QAM membutuhkan rasio daya SNR berturut-turut sebesar 10 dB, 17 dB, 23 dB dan 29 dB pada target BER yang diharapkan yaitu sebesar  $10^{-3}$ .
4. Pada target BER  $< 10^{-3}$  *transmitter* dengan sudut  $60^\circ$  daya yang dibutuhkan pada format konstelasi 4-QAM dan 16-QAM untuk jarak terjauh 6.5 watt dan 14.5 watt.
5. Simulasi ACO OFDM untuk komunikasi cahaya tampak pada kanal LOS, format konstelasi yang disarankan yaitu 4-QAM. Hal ini didasarkan pada parameter untuk format tersebut rasio daya yang dibutuhkan merupakan yang terendah dibanding format lain untuk mendapatkan target BER yang sama.

### 4.2 Saran

1. Melakukan simulasi dengan modulasi OFDM teknik lain pada *Optical Wireless Communication* untuk membandingkan teknik dengan hasil yang terbaik.
2. Melakukan simulasi dengan model kanal berbeda pada sistem VLC, seperti *non-LOS* dan *diffused*.
3. Melakukan penelitian dengan sistem model VLC yang memiliki lebih dari 1 sumber LED, dengan ragam *noise* yang ada.

### Daftar Pustaka:

- [1] N. Serafimovski and C. J. "Economic Considerations for Light Communications," in *IEEE 802.11-17*, 2017.
- [2] D. Shin, d. obrien and T.-G. Kang, "Visible Light Communication : Tutorial," *IEEE P802.15*, 2008.
- [3] N. Yudhabrama, I. Wijayanto and S. Hadiyoso, *Perancangan dan analisis pengiriman data digital berbasis visible light communication*, Bandung: Universitas Telkom, 2017.
- [4] Z. Ghassemlooy, W. Popoola and S. Rajbhandari, *Optical Wireless Communications System and Channel Modelling with MATLAB*, CRC Press, 2012.
- [5] W. Shieh and I. Djordjevic, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing for Optical Communication*, London: Elsevier, 2010.
- [6] J. Armstrong, B. J. Schmidt, D. Kalra, H. A. Sraweera and A. J. Lowery, "Performance of Asymmetrically Clipped Optical OFDM in AWGN for an Intensity Modulated Direct Detection System," in *IEEE GLOBECOM*, Melbourne, 2006.
- [7] S. Devasmitha and J. Armstrong, "Comparison of ACO-OFDM, DCO-OFDM and ADO-OFDM in IM/DD Systems," 2013.
- [8] S.K. Hashemi, Z. Gassemlouy, L. Chao and D. Benhaddou, "Orthogonal Frequency Division Multiplexing for Indoor Optical Wireless Communications using Visible Light LEDs," 2008.
- [9] J. G. Proakis, M. Salehi and G. Bauch, *Contemporary Communcation Systems Using MATLAB*, third edition, Stamford: Global Engineering, 2011.
- [10] M. S. Shahab, I. Hidayat and D. Darlis, *Implementasi dan sintesis komunikasi cahaya tampak menggunakan i/fft 64-titik pada fpga*, Bandung: Universitas Telkom, 2017.
- [11] Z. Wang, T. Mao and Q. Wang, "Optical OFDM for Visible Light Communication," Beijing, 2017.