

# Analisa Kinerja Teknik Modulasi Digital pada Kanal Optik Nirkabel

## *Performance Analysis of Digital Modulation Techniques on Wireless Optical Channel*

Dwi Astharini<sup>\*</sup>, Ary Mayola, Octarina Nur Samijayani, Ary Syahriar

Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Al Azhar Indonesia  
Jl. Sisingamangaraja, Jakarta 12110

---

### Abstrak

Transmisi optik nirkabel dengan kecepatan tinggi memiliki berbagai potensi untuk aplikasi jarak pendek terutama untuk komunikasi di dalam ruangan. Tulisan ini memaparkan perbandingan kinerja transmisi FSO menggunakan beberapa variasi skema modulasi. Pengamatan unjuk kinerja terutama dilakukan menggunakan *bit error rate* (BER). Gangguan turbulensi atmosferik menjadi bagian dari pemodelan kanal log normal yang digunakan dalam simulasi. Modulasi dasar spasial yang digunakan adalah *on-off keying* sebagai teknik klasik FSO, beserta *pulse position modulation* yang merupakan variasi spasialnya. Menelaah penggunaan modulasi baseband untuk sistem optik, disimulasikan PSK 2, 4, 8, 16, serta QAM 4 dan 16. Simulasi dengan data ukuran kecil menghasilkan bahwa BPSK dan 4 QAM menunjukkan unjuk kerja terbaik dengan BER rata-rata sekitar  $10^{-3}$  pada kondisi gangguan sedang sampai tinggi. Sementara tingkat error pada OOK dan PPM masih di atas  $10^{-0.5}$ .

**Kata kunci:** FSO, OOK, PPM, PSK, QAM

---

### Abstract

*Free space optical transmission with its data speed has many potential in close range especially indoor communication. This paper compared the performance of FSO transmission on a number of modulation schemes. The observations are mainly made by comparing the bit error rate result for each scheme. Atmospheric turbulence and noise are introduced to the transmission channel in the form of log normal model on simulation. The basic modulations simulated are on-off keying as the classical technique for FSO, and its spatial variation, the pulse position modulation. Exploring the baseband modulations for optic application, also implemented are the PSK of 2, 4, 8, 16, and QAM of 4 and 16. Simulation with short data-length resulted that BPSK dan 4-QAM gave best performance among all, with average BER of  $10^{-3}$  in medium to high turbulence condition. While the error level of OOK and PPM are  $10^{-0.5}$  at best.*

**Keywords:** FSO, OOK, PPM, PSK, QAM

---

### I. PENDAHULUAN

*Free Space Optic* (FSO) merupakan teknik komunikasi optik dimana data ditransmisikan melalui propagasi cahaya pada ruang bebas sebagai medium antar *transceiver*. FSO dapat digunakan sebagai alternatif sistem komunikasi radio dengan link *line-of sight* (LOS). Sistem komunikasi ini semakin menarik perhatian luas karena beberapa kelebihanannya dibandingkan sistem komunikasi gelombang radio terutama karena kecepatan tinggi dan tidak membutuhkan *license* dalam penggunaan spektrum. Penelitian dan pengembangan dalam bidang ini menjajaki berbagai metode pemrosesan sinyal maupun aplikasi. Salah satu implementasi yang mendapat perhatian adalah Li-fi atau *light fidelity*, yang memiliki fungsi serupa Wifi namun menggunakan gelombang

cahaya tampak atau *visible light communication* (VLC), sehingga memiliki kecepatan yang lebih tinggi. Implementasi lain yang dikembangkan adalah untuk komunikasi antar titik dalam jaringan yang menggunakan beragam media seperti *smart city* ataupun *Internet of Things* (IoT).

Teknik modulasi yang digunakan secara luas pada sistem komunikasi optik umumnya berbasis modulasi sederhana *on-off keying* (OOK) [1], [2]. Pada tulisan ini dipaparkan simulasi transmisi optik nirkabel pada berbagai tingkat gangguan turbulensi atmosferik menggunakan beberapa variasi skema modulasi, yaitu *pulse position modulation* (PPM) yang merupakan variasi OOK, dan modulasi MPSK dan MQAM.

Pengembangan model kanal FSO telah dilakukan oleh [3] khususnya untuk indoor beserta turbulensi atmosferik. Performansi berbagai skema modulasi dibandingkan pada [1] dan [4] antara lain untuk rasio error, daya dan bandwidth. Beberapa pengembangan melakukan pengamatan untuk transmisi optik nirkabel untuk masing-masing satu jenis modulasi, yaitu salah satu varian PPM [5], pengembangan modulasi hybrid

---

<sup>\*</sup> Corresponding Author.

Email: astharini@uai.ac.id

Received: May 10, 2017 ; Revised: July 27, 2017

Accepted: August 01, 2017 ; Published: August 31, 2017

© 2017 PPET - LIPI

PPM dan MSK [6], serta QAM [7]. Pada tulisan kami sebelumnya [8], [9] dilakukan eksplorasi terhadap modulasi QAM, PSK, dan OFDM untuk komunikasi nirkabel dengan model AWGN dan Rayleigh. Sebagai salah satu langkah adaptasi *multi carrier* atau OFDM untuk sistem optik, pada [10] dan [11] diketengahkan teknik koreksi error yaitu *forward error correction* pada transmisi.

Tulisan ini memaparkan perbandingan kinerja transmisi FSO menggunakan beberapa variasi skema modulasi yaitu OOK, PPM PSK 2,4,8, dan 16, serta QAM 4 dan 16. Variabel kinerja adalah *bit error rate* atau BER, yang diambil dari hasil pengamatan pada data di sisi penerima. Dari pekerjaan yang dilakukan diharapkan menjadi rekomendasi untuk pemilihan teknik modulasi untuk sistem komunikasi optik nirkabel, khususnya mengantisipasi sistem multi user ke depan.

Bagian selebihnya tulisan ini disusun sebagai berikut. Pada bagian kedua disampaikan mengenai model sistem yang disimulasikan berikut keempat teknik modulasi. Pada bagian tiga dipaparkan skenario simulasi. Bagian empat menampilkan hasil simulasi dan analisa. Tulisan diakhiri dengan kesimpulan.

## II. MODEL SISTEM DENGAN BERBAGAI MODULASI

Standar sistem komunikasi optik yang digunakan saat ini, adalah hanya berbasis OOK. Penerapan pengolahan sinyal berbasis perangkat lunak pada komunikasi optik atau *software-defined optical transmission* mendorong penggunaan berbagai variasi modulasi yang lebih kompleks. Semua itu dilakukan untuk memperoleh kapasitas yang lebih tinggi pada transmisi optik. Dari dua tipe OOK yaitu RZ (*return to zero*) dan NRZ (*non return to zero*) pada tulisan ini digunakan NRZ-OOK sebagai pembandingan.

*Pulse Position Modulation* atau PPM adalah teknik modulasi di mana suatu slot waktu dibagi menjadi  $2^M$  pulsa satuan, dan data sebesar  $M$ -bit dikodekan sebagai salah satu pulsa tersebut. Cara ini dapat menghemat penggunaan daya dibandingkan OOK, namun memperbesar penggunaan sumber lain seperti bandwidth dan kompleksitas pensinyalan. Pustaka [5] melakukan implementasi PPM untuk optik nirkabel menggunakan 2 LED.

Dibandingkan dengan OOK dan PPM yang berbasis spasial, PSK dan QAM merupakan modulasi sub carrier yang belum lama mulai ditelaah untuk komunikasi optik nirkabel. Antara lain [1] melakukan pembandingan unjuk kerja antara OOK dan beberapa varian MPSK, dan [6] mengembangkan modulasi berbasis BPSK dan

PPM untuk optik nirkabel. [7] mengamati performansi QAM pada beberapa model kanal FSO.

Gambar 1 menunjukkan model sistem yang disimulasikan untuk pengamatan. Pada bagian modulasi dan demodulasi keempat teknik diimplementasi untuk dibandingkan performansi masing-masing. RZ-OOK 2 bit dan PPM-4 yang digunakan pada tulisan ini ditampilkan pada Gambar 2. PSK dan QAM yang diterapkan adalah pada beberapa variasi, yang dijabarkan pada bagian selanjutnya.

Perhitungan BER tidak dilakukan menggunakan model error, tetapi dengan membandingkan secara langsung data diterima dengan data asli, seperti pada Persamaan (1).

$$BER = 1/N(\sum |D - D_{terima}|) \quad (1)$$

dengan

$D$ : Data

$N$ : jumlah data

Tulisan mengamati performansi transmisi optik nirkabel pada simulasi, yang mengimplementasi model sistem pada Gambar 1. Pada bagian modulasi dalam gambar tersebut dilakukan variasi tipe dan parameter modulasi, sebagaimana ditampilkan pada Tabel 1. Modulasi PSK diimplementasikan dengan 3 tingkat pengkodean yaitu 2, 4, dan 16. Modulasi QAM disimulasikan pada tingkat pengkodean 4 dan 16. Sehingga total dilakukan pembandingan atas tujuh macam modulasi yaitu OOK, PPM 4, 3 tipe PSK dan 2 tipe QAM.

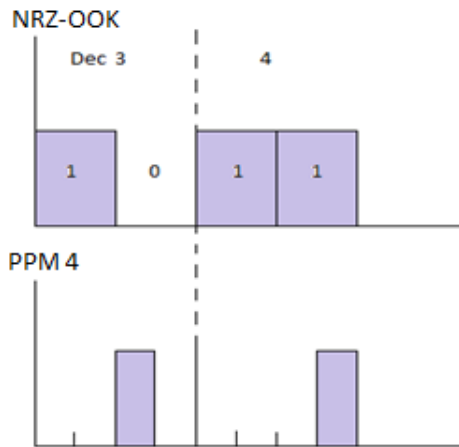
TABEL 1  
SKEMA MODULASI

Modulasi	Parameter	
	Tipe	M
OOK	NRZ	2
PPM	NRZ	4
PSK	Circular	2, 4, 16
QAM	Square	4, 16

PSK dan QAM dipilih untuk implementasi sebagai modulasi passband, yang juga merupakan bagian dari standar untuk implementasi OFDM [8], [9] sebagai pengkodean pada domain kompleks. Implementasi OFDM sendiri pada sistem komunikasi optik membutuhkan penyesuaian. Di antara penyesuaian yang ditawarkan adalah koreksi error atau *forward error correction*. Pada [10] dan [11], koreksi ini dilakukan dengan teknik *low-density parity-check* atau LDPC, yang menggunakan matriks paritas pada bagian pemancar dan penerima untuk melakukan pengecekan dan koreksi data. Implementasi dilakukan menggunakan prinsip *sub carrier intensity modulation* SIM [2].



Gambar 1. Model Sistem



Gambar 2. OOK 2 Bit dan PPM 4 Slot Waktu.

### III. KANAL OPTIK NIRKABEL

Transmisi data optik nirkabel (FSO) dalam ruangan selain syarat utama yaitu *line of sight* (LOS), juga dipengaruhi berbagai hal. Di antara yang signifikan adalah pola radiasi, serta gangguan yang dimodelkan sebagai turbulensi atmosferik.

Gangguan turbulensi atmosferik adalah efek transmisi optik nirkabel menggunakan medium terbuka, yang memiliki indeks bias yang bukan saja tidak konstan sepanjang transmisi maupun waktu, yaitu dapat bervariasi secara acak. Efek ini juga disebut sebagai fluktuasi iradiansi atau *scintillation*, dan memberikan pengaruh gangguan pelemahan atau *fading* pada sinyal yang diterima setelah transmisi. Besaran gangguan ini dipetakan dalam skala 0-1, yang menunjukkan tingkat gangguan pada sinyal yang ditransmisikan. Secara umum angka tersebut diartikan kekuatan sinyal optik yang diterima, setelah mengalami efek *fading* pada proses transmisi.

Model kanal berikut gangguan turbulensi yang diimplementasi pada tulisan ini diimplementasi menggunakan model kanal atmosferik log normal sesuai [2].

$$I = I_0 \exp\left(\sqrt{P_{out} \sigma^2} - \sigma^2/2\right) \quad (2)$$

dengan

- $I$  : sinyal diterima
- $I_0$  : sinyal dikirimkan
- $P_{out}$  : probabilitas keluaran
- $\sigma^2$  : tingkat iradiansi atau index scintillation.

Besaran probabilitas luaran ditentukan menggunakan distribusi normal. Pada model Persamaan (2) yang dimaksud sebagai sinyal yang diterima adalah sinyal yang masuk ke pemancar yang akan menjalani proses demodulasi, sementara sinyal dikirimkan adalah sinyal keluar dari pemancar setelah menjalani proses pengolahan termasuk modulasi.

Tingkat iradiansi dapat memiliki nilai dalam rentang 0 sampai 0,9. Indeks gangguan ini secara umum dikelompokkan pada tiga kategori yaitu sangat rendah, rendah sampai tinggi, dan mendekati saturasi. Kategori gangguan rendah umumnya adalah kondisi dalam

ruangan atau *indoor* yang terkendali, dengan *scintillation index* tidak lebih dari 0,1; sementara mendekati 0,9 adalah kondisi transmisi luar ruangan dengan berbagai gangguan termasuk misalnya kabut dan asap.

Lebih jauh mengenai model kanal atmosferik log normal maupun model lain untuk kanal optik nirkabel dapat dilihat pada [2] dan [3], juga pada [12] dan [13].

### IV. HASIL PENGAMATAN

Pada tulisan ini ditampilkan data yang diperoleh dari pengamatan pada simulasi untuk berbagai skema modulasi, pada *electrical* SNR 2 sampai 12. Mula-mula dilakukan perbandingan antara berbagai teknik modulasi pada satu kondisi turbulensi atmosferik yang ditampilkan pada bagian IVA, kemudian dilakukan pengamatan pada satu teknik modulasi untuk berbagai kondisi gangguan turbulensi atmosferik yang ditampilkan pada bagian IVB.

Simulasi dijalankan untuk transmisi data pendek yaitu hanya pada kisaran kilobytes. Pengamatan nilai BER yang diambil dilakukan melalui perbandingan langsung antara data diterima dengan data yang dikirimkan, dan bukan melalui perhitungan model error stokastik, sebagaimana telah ditampilkan pada Persamaan (1) di bagian sebelumnya.

#### A. Variasi Skema Modulasi

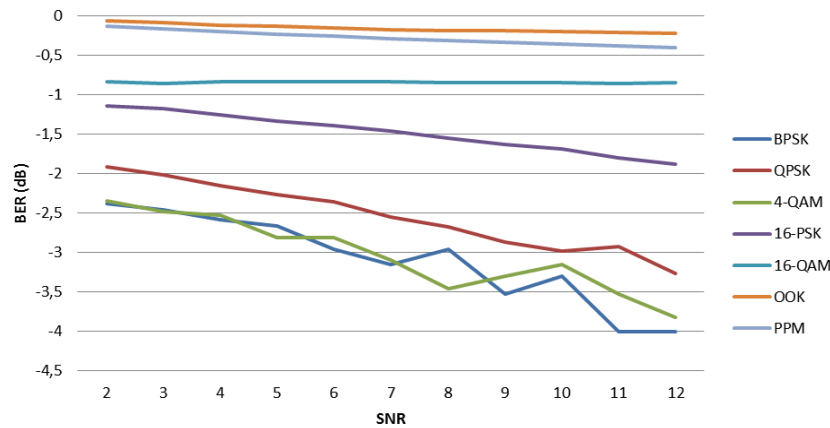
Pengamatan unjuk kerja sistem dengan berbagai modulasi dilakukan pada satu kondisi kanal yaitu kekuatan turbulensi atmosferik iradiansi = 0,7. Angka 0,7 pada skala turbulensi atmosferik termasuk kategori tinggi namun belum termasuk ke kategori daerah saturasi.

Pada Gambar 3 di tampilkan unjuk kerja rata-rata dari masing-masing dari tujuh skema modulasi pada SNR elektrik 2 sampai 12 pada iradiansi 0,7. Gambar 4 menunjukkan unjuk kerja rata-rata ketujuh modulasi yang sama.

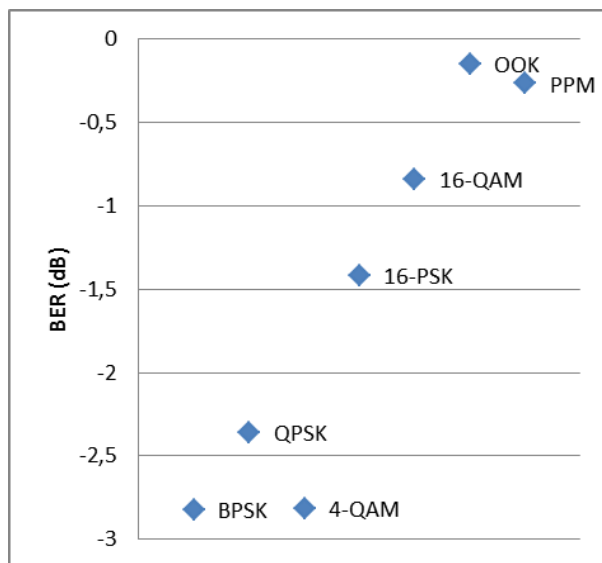
Secara keseluruhan performansi *error* yang ditampilkan menunjukkan tingkat kesalahan yang tinggi. Sampai SNR elektrik 12 nilai BER yang diperoleh masih berada dalam daerah sekitar  $10^{-3}$ . Hal ini antara lain disebabkan oleh panjang data yang dikirimkan yang hanya pada besaran kb.

Tampak bahwa OOK dan PPM sangat rentan pada kondisi gangguan atmosferik tinggi yang diberikan. Keduanya menunjukkan nilai BER di atas -0.5 dB yang berarti bahwa kesalahan yang terjadi sangat besar, bahkan pada beberapa kondisi diperoleh hasil bahwa lebih dari setengah pengiriman data mengalami kesalahan. Dari hasil ini dapat dilihat bahwa modulasi dasar baik OOK ataupun variasi PPM tidak memadai untuk transmisi komunikasi optik nirkabel, khususnya untuk kondisi turbulensi tinggi.

Berbagai tingkat  $M$ -ary PSK dan QAM sebagai modulasi passband secara keseluruhan menunjukkan kinerja yang lebih baik dari dua modulasi dasar OOK dan PPM. Pada gilirannya tingkat pengkodean  $M$  pada PSK dan QAM memberikan variasi hasil yang signifikan.



Gambar 3. BER Berbagai Modulasi untuk SNR 2-12 pada Iradiasi 0,7



Gambar 4. BER Rata-Rata Berbagai Modulasi untuk SNR ≤ 12 pada Iradiasi 0,7.

BPSK dan 4 QAM menunjukkan unjuk kerja terbaik dengan pada rentang  $10^{-2.5}$  dB sampai  $10^{-4}$  dB. Nilai BER rata-rata keduanya mendekati  $10^{-3}$ . 16 QAM dan 16 PSK menunjukkan performansi yang rendah dengan nilai BER rata-rata masih pada kisaran  $10^{-1}$ . Performansi yang lebih baik ditunjukkan pada QPSK yang memberikan hasil tengah. QPSK menunjukkan kinerja yang lebih baik dengan BER pada rentang antara  $10^{-2}$  sampai  $10^{-2.5}$ . Perlu diingat bahwa data yang ditampilkan diperoleh untuk transmisi dengan SNR tidak lebih dari 12, dan pada turbulensi atmosfer tinggi yaitu 0,7. Jika pengamatan diperluas pada rentang SNR di atas 12 diharapkan akan diperoleh nilai BER yang lebih kecil seiring pertambahan SNR, dan memberikan nilai rata-rata keseluruhan yang lebih kecil pada setiap tipe modulasi.

Sebagai perbandingan hasil pengamatan, adalah [1] yang membandingkan kinerja modulasi OOK, BPSK dan QPSK, di mana diperoleh nilai BER sekitar  $10^{-6}$  pada SNR 12, pada scintillation index di bawah 0,6. Selain tidak melakukan perbandingan dengan QAM dan rentang index scintillation yang berbeda, perbedaan lain tulisan tersebut adalah bahwa nilai BER diperoleh dari kalkulasi model probabilistik dan bukan perbandingan data langsung. Referensi ini juga menampilkan kalkulasi BER untuk rentang SNR yang

lebih tinggi dari 12 dibandingkan tulisan ini, yaitu dari 0 sampai 20.

### B. Efek Gangguan Kanal

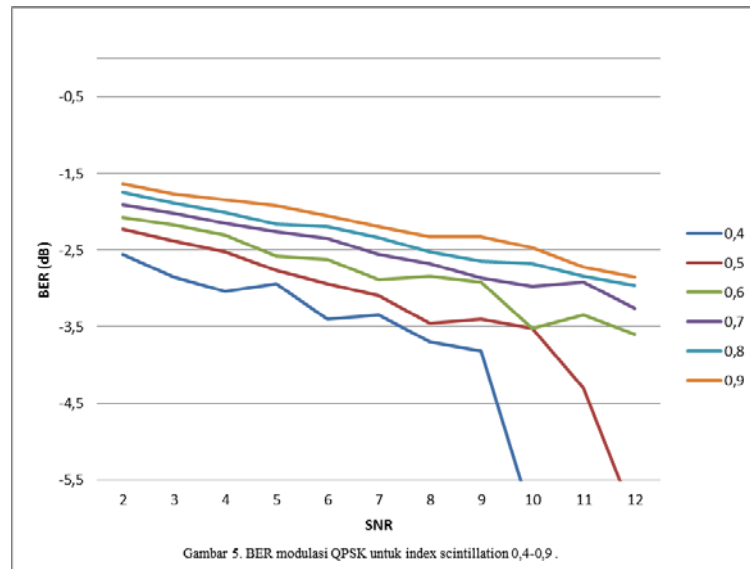
Untuk mengamati efek turbulensi atmosferik pada transmisi optik nirkabel, dilakukan perbandingan terhadap satu jenis modulasi, dengan tingkat iradiansi yang memberikan efek fading pada nilai 0,4 sampai 0,9. Rentang angka tersebut mencerminkan gangguan tingkat menengah sampai tinggi [12]. Sebagai perbandingan, turbulensi untuk ruangan tertutup pada area terkendali atau indoor umumnya dimodelkan dengan index scintillation di bawah 0,1 [13], yang dikategorikan sebagai turbulensi atmosferik rendah dan sangat rendah.

Modulasi yang diambil untuk pengamatan adalah QPSK, yang pada hasil sebelumnya menunjukkan performansi medium atau cukup baik, dengan BER rata-rata di sekitar nilai -2,5 dB. Seperti sebelumnya pengamatan dilakukan pada kondisi SNR 2 s ampai dengan 12, dengan nilai BER yang diperoleh dari perbandingan langsung antara sinyal hasil proses keseluruhan dengan sinyal asli.

Gambar 5 menampilkan hasil pengamatan *error* pada data diterima. Tampak bahwa unjuk kerja QPSK, mengalami peningkatan yang ditunjukkan dengan penurunan BER yang signifikan terutama pada scintillation index di bawah 0,7. Pada indeks 0,4 dan 0,5 nilai BER yang dicapai berada di bawah  $10^{-5}$  untuk kondisi SNR tinggi, yang merupakan kondisi yang umum diamati pada transmisi nyata.

Melihat kembali Gambar 4 yang menampilkan grafik QPSK selalu memiliki BER yang lebih tinggi dari BPSK dan QAM untuk setiap kondisi SNR, dapat diperkirakan bahwa hal yang sama juga akan berlaku di sini. Yaitu bahwa transmisi dengan modulasi BPSK dan QAM akan menunjukkan error di bawah  $10^{-5}$  untuk kondisi SNR tinggi. Lebih jauh lagi sebagaimana disampaikan sebelumnya, saat SNR meningkat di atas 12, juga diperkirakan akan diperoleh penurunan error yang lebih signifikan.

Dari bagian ini terlihat bahwa baik QPSK, BPSK dan QAM akan memberikan performansi yang cukup baik untuk digunakan pada transmisi optik nirkabel, untuk kondisi turbulensi atmosferik sampai dengan tingkat menengah yang sudah merupakan kondisi luar ruangan atau outdoor.



Gambar 5. BER Modulasi QPSK dengan Scintillation Index 0,4-0,9

### KESIMPULAN

Penelitian ini membahas kinerja transmisi optik nirkabel menggunakan modulasi OOK, PPM, MPSK dan MQAM, pada kanal berturbulensi atmosferik dengan model log normal. Dari performansi error yang diamati pada pengiriman data pendek dalam kondisi turbulensi tinggi dengan SNR 2-12, BPSK dan 4 QAM menunjukkan hasil terbaik dengan BER rata-rata mendekati  $10^{-3}$ . Sehingga kedua modulasi ini dapat direkomendasikan untuk digunakan secara langsung pada komunikasi FSO. Modulasi konvensional OOK ataupun variasinya yaitu PPM menunjukkan kinerja yang buruk untuk gangguan tinggi, yaitu dengan nilai BER di kisaran  $10^{-0.5}$ , sehingga tidak direkomendasikan untuk transmisi optik nirkabel. Penelaahan yang dilakukan secara khusus untuk kinerja QPSK menunjukkan hasil yang baik untuk scintillation index kurang dari 0,5 yang merupakan kondisi optik nirkabel dengan gangguan sampai tingkatan sedang.

Pengembangan pengerjaan selanjutnya akan dilakukan pengamatan untuk transmisi dengan data yang lebih panjang, serta kondisi electrical SNR diperluas di atas 12, sampai dengan angka 20 atau 30. Untuk gangguan atmosferik akan diberikan perhatian lebih luas pada gangguan ringan sampai sedang, terutama yang memodelkan kondisi transmisi optik nirkabel di dalam ruangan. Selain itu juga dengan mengaplikasikan pengkodean maupun teknik modulasi yang lebih kompleks seperti OFDM. Kedua modulasi dengan unjuk kerja terbaik dapat dijadikan titik tolak pengkodean pada OFDM yang menggunakan PSK dan QAM sebagai salah satu prosesnya.

### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan penghargaan kepada Kementerian Riset, Teknologi dan Pendidikan Tinggi Republik Indonesia atas penyusunan artikel ini sebagai bagian dari pendanaan Penelitian Produk Terapan tahun 2016.

### DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. Barua and D. Barua, "Evaluate the performance of FSO communication link with different modulation technique under turbulent condition," in *Proceedings of The 14th International Conference on Computer and Information Technology (ICCIT)*, 2011, pp. 191-195.
- [2] Z. Ghassemlooy, W. Popoola, S. Rajbhandari, *Optical Wireless Communications: System and Channel Modelling with MATLAB®*, CRC Press, 2012.
- [3] R. Pernice, A. Anda, D. Musso, A. Parisi, L. Curcio, G. Adamo, S. Stivala, A.C. Busacca, "Optical turbulence measurements and channel modeling of an indoor free space optics link," in *Proceedings of Fotonica AEIT Italian Conference on Photonics Technologies*, 2014, pp. 1-4.
- [4] R. Mesleh, H. Elgala and H. Haas, "An overview of indoor OFDM/DMT optical wireless communication systems," in *Proceedings of The 7th International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Signal Processing (CSNDSP 2010)*, 2010, pp. 566-570.
- [5] H.G. Olanrewaju, J. Thompson and W.O. Popoola, "Generalized spatial pulse position modulation for optical wireless communications," in *Proceedings of The 84th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*, 2016, pp. 1-5.
- [6] H. Liu, R. Liao, Z. Wei, Z. Hou and Y. Qiao, "BER analysis of a hybrid modulation scheme based on PPM and MSK subcarrier intensity modulation," in *IEEE Photonics Journal*, vol. 7, no. 4, pp. 1-10, Aug. 2015.
- [7] M. Z. Hassan, X. Song and J. Cheng, "Subcarrier intensity modulated wireless optical communications with rectangular QAM," in *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 4, no. 6, pp. 522-532, June, 2012.
- [8] D. Astharini, T. Bastian, R. Mustika, O. N. Samijayani, R. Safitri, "Zero padding and cyclic prefix for OFDM on multipath rayleigh fading channel," *Journal of Mobile Multimedia*, Vol. 11, no.3&4, pp. 330-338, 2015.
- [9] N. S. Paujia, D. Astharini, O. N. Samijayani, "SER and BER analysis using GNU radio for PSK and QAM modulation," in *Proceedings of International Seminars on Science, Technology and Innovations (ISSTIN)*, 2012, pp. 136-141.
- [10] C. Kachris, G. Tzimpragos, D. Soudris, I. To mkos, "Reconfigurable FEC codes for software-defined optical transceivers," in *Proceedings of 13th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON)*, 2014, pp. 9-10.
- [11] R. Sahputra, D. Astharini, Faisal, "LDPC code for OFDM transmission using bit flipping and sum product algorithm," *Advanced Science Letters*, Vol. 23, no. 4, pp. 3754-3757, April, 2017.
- [12] A. Tunick, "Optical turbulence parameters characterized via optical measurements over a 2.33 km free-space laser path," *Optics Express*, Vol. 16, no. 19, pp. 14645-14654, Sep. 2008.

- [13] R. Pernice, A. Andò, M. Cardinale, L. Curcio, S. Stivala, A. Parisi, A. C. Busacca, Z. Ghassemlooy, J. Perez, "Indoor free space optics link under the weak turbulence regime: measurements and model validation," in *IET Communications*, vol. 9, no. 1, pp. 62-70, 2014.