

# Analisis Perbandingan Kinerja Sistem Radio Over Fiber dan Free Space Optic Dengan Input Sinyal RF Termodulasi QAM

## A Performance Comparison Analysis of Radio Over Fiber and Free Space Optic Systems with QAM Modulated RF Input Signal

Febrizal Ujang<sup>1\*</sup>, Andhika Nugraha<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Jurusan Teknik Elektro, Universitas Riau, Indonesia

febrizal@eng.unri.ac.id<sup>1\*</sup>, andhika.nugraha5196@student.unri.ac.id<sup>2</sup>

**Abstrak** – Kemajuan teknologi saat ini telah memungkinkan untuk menumpangkan sinyal radio frequency (RF) di atas sinyal optik. Selain dapat ditransmisikan melalui fiber optik, sinyal optik juga dapat ditransmisikan melalui udara bebas yang dikenal dengan sistem Free Space Optic (FSO). Sinyal optik yang ditumpangki oleh sinyal RF dan ditransmisikan melalui serat optik dikenal dengan sistem Radio over Fiber (ROF). Pada sistem ROF, dispersi kromatik fiber menyebabkan terjadinya fluktuasi daya pada sinyal radio frequency (RF) yang diterima. Fluktuasi daya ini menyebabkan kinerja sistem ROF mengalami penurunan yang sangat besar pada panjang fiber tertentu. Pada sistem FSO, sinyal optik mengalami redaman yang dipengaruhi oleh kondisi cuaca. Untuk menghindari kesalahan dalam menentukan panjang fiber yang digunakan pada sistem ROF dan jarak antara pemancar dan penerima pada sistem FSO yang dapat mengakibatkan kinerja sistem tidak memenuhi standar sistem komunikasi optik, maka perlu dilakukan pengukuran kinerja dari kedua sistem ini. Kinerja sistem dalam penelitian ini diukur dari nilai  $Q$ -faktornya. Nilai  $Q$ -factor diperoleh dari simulasi menggunakan software OptiSystem. Hasil penelitian ini menunjukkan panjang fiber pada sistem ROF yang perlu dihindari adalah pada panjang fiber 0,9 – 1,3 km, 2,7 – 3,5 km, dan 4,7 – 5 km. Hal ini berlaku pada daya laser 0 maupun 10 dBm. Sedangkan jarak maksimum antara pemancar dan penerima pada sistem FSO 0,5 km saat daya laser sebesar 0 dBm dan 1,6 km pada saat daya laser sebesar 10 dBm.

**Kata Kunci:** Radio Over Fiber, Free Space Optic, QAM

**Abstract** – Current technological advances have made it possible to superimpose radio frequency (RF) signals over optical signals. Besides being transmitted through optical fiber, optical signals can also be transmitted through free air known as Free Space Optic (FSO) system. Optical signals that are superimposed by RF signals and transmitted through optical fibers are known as Radio over Fiber (ROF) systems. In ROF systems, fiber chromatic dispersion causes power fluctuations in the received radio frequency (RF) signal. These power fluctuations cause the performance of the ROF system to decrease greatly at certain fiber lengths. In FSO systems, optical signals experience attenuation which is influenced by weather conditions. To avoid errors in determining the length of fiber used in the ROF system and the distance between the transmitter and receiver in the FSO system which can result in system performance

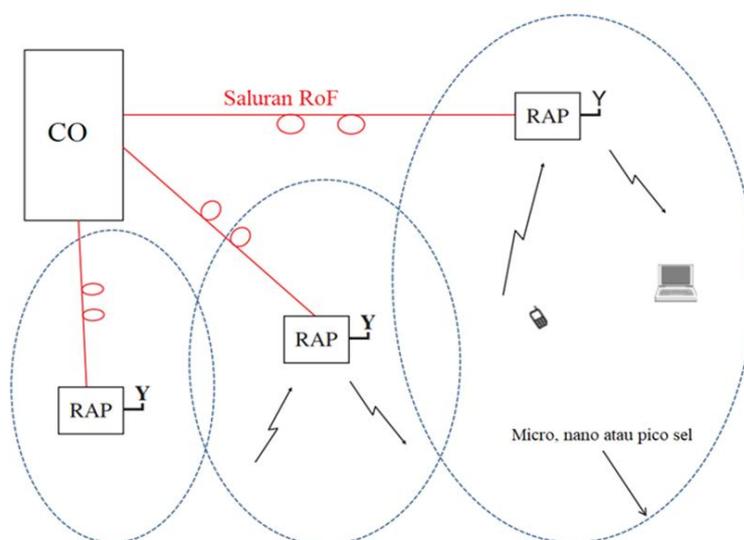
not meeting the standards of optical communication systems, it is necessary to measure the performance of these two systems. System performance in this study is measured by the  $Q$ -factor value. The  $Q$ -factor value is obtained from simulations using OptiSystem software. The results of this study show that the fiber lengths in the ROF system that need to be avoided are at fiber lengths of 0.9 - 1.3 km, 2.7 - 3.5 km, and 4.7 - 5 km. This applies to both 0 and 10 dBm laser power. Meanwhile, the maximum distance between the transmitter and receiver in the FSO system is 0.5 km when the laser power is 0 dBm and 1.6 km when the laser power is 10 dBm.

**Keywords:** Radio Over Fiber, Free Space Optic, QAM

## 1. Pendahuluan

Saat ini kebutuhan akan jaringan internet dan pertukaran data berkecepatan tinggi sangat dibutuhkan. Hal ini dapat dipenuhi dengan menggunakan frekuensi yang tinggi karena dapat memberikan kapasitas *bandwidth* yang lebar. Meskipun dapat menghasilkan *bandwidth* yang lebar, namun penggunaan frekuensi tinggi memiliki konsekuensi jangkauan *cell* yang lebih kecil. Hal ini dapat diatasi dengan memperpendek saluran nirkabel yaitu dengan menggunakan *pico cell* atau memperbanyak titik akses radio (*Radio Access Point/ RAP*) seperti ditunjukkan pada Gambar 1 [1].

*Pico cell* dapat diaplikasikan dengan media transmisi berupa serat optik yang dikenal dengan sistem *Radio Over Fiber* (ROF) maupun udara bebas yang dikenal dengan istilah *Free Space Optic* (FSO) [2, 3]. Komunikasi optik yang digunakan pada sistem *pico cell* ini merupakan sistem komunikasi optik analog dimana pembawa optik dimodulasi oleh sinyal RF, bukan sinyal *baseband* digital seperti komunikasi optik pada umumnya [4]. RAP berfungsi untuk mengubah sinyal optik menjadi sinyal RF dan meneruskannya secara nirkabel ke *mobile station* (MS) atau *user*. Sedangkan seluruh proses pengolahan sinyal dilakukan di *central office* (CO).



Gambar 1. Arsitektur sederhana sistem ROF/ FSO.

ROF merupakan sistem dimana sinyal frekuensi radio (RF) ditransmisikan melalui *fiber optic*. Pada saluran ROF, sinyal RF diubah menjadi sinyal *optic* menggunakan *electric to optic* (E/O) *converter* yang terletak di CO. Sinyal optik kemudian ditransmisikan melalui kanal fiber dan di-*recovery* menjadi sinyal RF kembali menggunakan *optic to electric* (O/E) *converter* yang terletak di RAP. Sinyal RF hasil *recovery* kemudian ditransmisikan dari RAP ke MS secara nirkabel [5]. Sistem ROF mempunyai kelebihan dapat menjangkau jarak yang jauh dan tidak dipengaruhi oleh *Line of Sight* (LOS), namun dispersi kromatik fiber menyebabkan daya sinyal RF yang di-*recovery* di RAP mengalami fluktuasi. Pada panjang fiber tertentu, penurunan daya

yang terjadi dapat mencapai  $> 20$  dB. Hal ini menyebabkan kinerja sistem ROF pada panjang fiber tertentu berada di bawah standar minimum.

FSO adalah sistem komunikasi optik yang menggunakan udara bebas (*free space*) sebagai media transmisi. Teknologi FSO memiliki beberapa keunggulan, antara lain *spectrum* frekuensinya bebas (*free licence*), *bandwidth* lebar, biaya instalasi lebih murah dan praktis karena *transceiver* FSO dapat diletakkan di dekat jendela maupun pada *rooftop* gedung. Pada sistem FSO juga tidak terdapat titik kritis seperti pada sistem ROF. Namun karena sistem FSO menggunakan udara bebas sebagai media transmisi, banyak faktor yang dapat meredam dan menginterferensi sinyal cahaya. Banyaknya molekul di udara serta kondisi atmosfer merupakan faktor yang menentukan kinerja sistem FSO [6]. Sehingga jarak transmisi pada sistem ini sangat dipengaruhi oleh kondisi cuaca. Selain itu, posisi antara *receiver* dan *transmitter* harus *Line of Sight* (LOS). Hal ini menyebabkan jarak antara CO dan RAP menjadi terbatas.

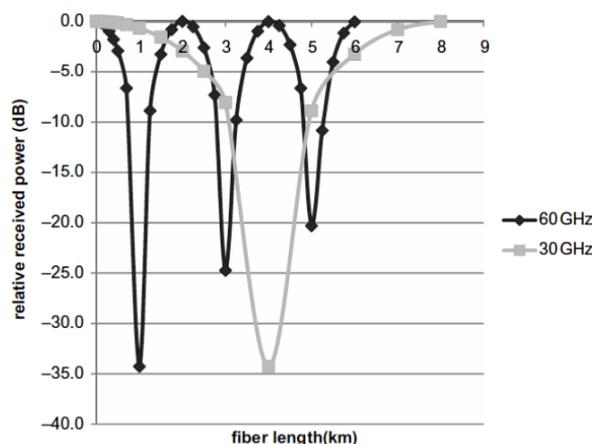
Modulasi *Quadrature amplitude modulation* (QAM) merupakan salah satu teknik modulasi yang umum digunakan pada sistem nirkabel karena dapat mendukung transmisi kecepatan tinggi pada kanal/ saluran dengan lebar pita terbatas [7]. Berdasarkan permasalahan yang dijumpai pada sistem ROF dan FSO, maka dalam penelitian ini ditentukan panjang fiber berapa yang harus dihindari pada sistem ROF dan berapa jarak maksimum antara CO dan RAP yang diperkenankan pada sistem FSO agar kedua sistem dapat memenuhi standar kinerja sistem komunikasi optik. Karena keunggulan yang dimiliki oleh modulasi QAM, maka input yang digunakan untuk pengujian ini adalah sinyal RF yang termodulasi QAM.

## 2. Metode Penelitian

### 2.1. Sistem ROF

Sistem ROF merupakan sistem yang dapat mentransmisikan sinyal RF melalui fiber optik. Transmisi dilakukan dengan cara memodulasi *optical carrier* ((yang berasal dari LED (*Light Emitting Diode*) maupun Laser (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*)) menggunakan sinyal RF yang akan ditransmisikan. Saat sinyal optik yang dimodulasi oleh sinyal RF ditransmisikan melalui fiber optik, dispersi kromatik fiber menyebabkan terjadinya fluktuasi pada daya sinyal RF yang di-*recovery* di RAP. Hal ini sesuai dengan persamaan daya sinyal RF yang ditunjukkan pada persamaan (1) dimana  $L$  adalah panjang fiber,  $D$  adalah dispersi dalam  $\text{ps.nm}^{-1}.\text{km}^{-1}$ ,  $\lambda_c$  adalah panjang gelombang pembawa optik,  $f_{RF}$  adalah frekuensi sinyal RF pemodulasi dan  $c$  adalah cepat rambat gelombang cahaya dalam ruang hampa. Kurva daya relatif sinyal RF yang diterima sebagai fungsi panjang fiber dengan  $\lambda_c = 1550$  nm,  $D = 17$   $\text{ps.nm}^{-1}.\text{km}^{-1}$  untuk sinyal RF dengan frekuensi 30 dan 60 GHz ditunjukkan pada Gambar 2 [8].

$$P_{RF} \propto \cos^2 \left( \frac{\pi LD}{c} \lambda_c^2 f_{RF}^2 \right) \quad (1)$$

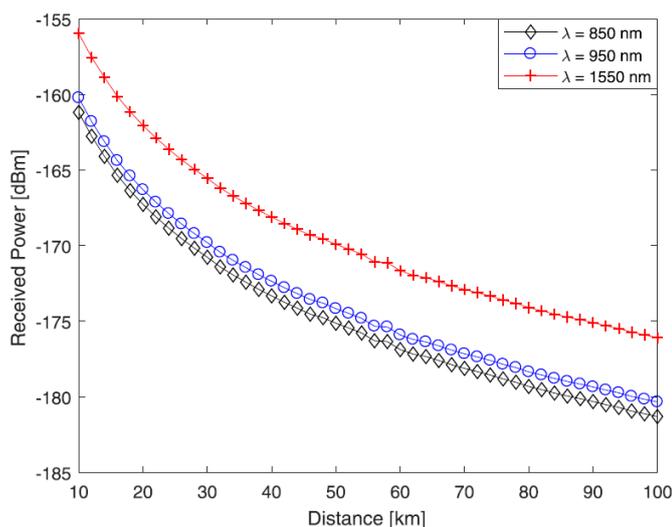


Gambar 2. Kurva daya relatif sinyal RF yang diterima sebagai fungsi panjang fiber.

Gambar 2 menunjukkan bahwa pada sistem ROF dengan frekuensi input berupa sinyal RF dengan frekuensi 60 GHz terjadi penurunan daya yang sangat besar pada panjang fiber 1, 3, dan 5 km. Saat sistem ROF diberi input berupa sinyal RF dengan frekuensi 30 GHz, penurunan daya yang besar terjadi pada panjang fiber 4 km. Semakin tinggi frekuensi sinyal RF yang digunakan, semakin banyak titik penurunan daya yang terjadi.

## 2.2. Sistem FSO

FSO merupakan sistem komunikasi optik yang menggunakan udara bebas sebagai media transmisinya. FSO juga dikenal dengan istilah *wireless optic*. Umumnya sistem FSO digunakan untuk mentransmisikan data *baseband*. Pada sistem ini, *optical carrier* dimodulasi oleh informasi *baseband* yang kemudian ditransmisikan melalui ruang bebas. Sedangkan dalam penelitian ini, FSO digunakan sebagai pembawa sinyal RF dari CO ke RAP dan sebaliknya. Di CO, sinyal baseband terlebih dahulu diubah menjadi sinyal RF dengan modulasi QAM. Sinyal RF kemudian digunakan untuk memodulasi *optical carrier*. Sinyal optik termodulasi RF kemudian ditransmisikan melalui ruang bebas menuju RAP. Di RAP, sinyal optik diubah menjadi sinyal listrik menggunakan *photodetector* PIN/ APD. Sinyal listrik ini kemudian dikirimkan secara nirkabel ke mobile station (MS). Tantangan utama dalam instalasi sistem FSO adalah redaman atmosfer yang disebabkan oleh penyerapan dan hamburan. Partikel air dan karbon dioksida adalah penyebab utama yang meredam sinyal optik. Sedangkan kabut, hujan, salju, dan awan adalah penyebab utama hamburan sinyal optik di ruang bebas.



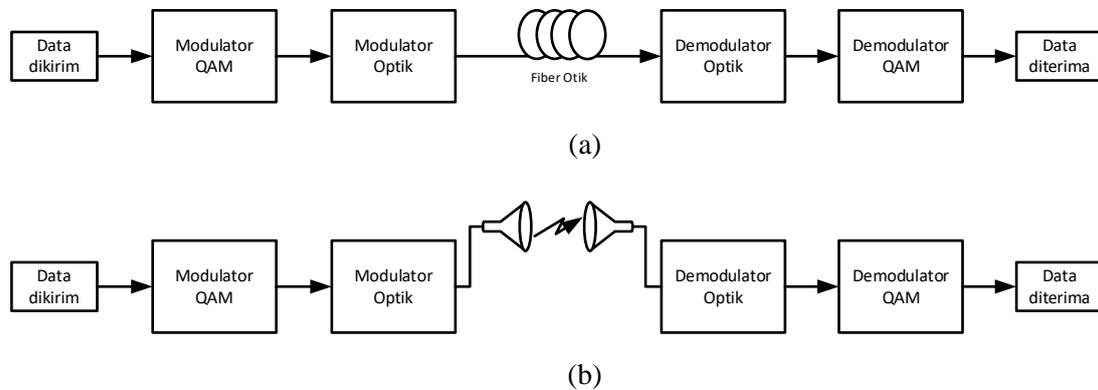
Gambar 3. Kurva daya sinyal optik yang diterima sebagai fungsi jarak.

Gambar 3 merupakan kurva daya sinyal optik yang diterima sebagai fungsi jarak pada sistem FSO pada kondisi cerah. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa semakin jauh jarak transmisi, maka daya yang diterima menjadi lemah dan sebaliknya. Selain itu juga dapat dilihat bahwa daya optik yang diterima pada saluran transmisi dengan panjang gelombang optik 1550 nm lebih besar jika dibandingkan dengan daya pada saluran transmisi yang menggunakan panjang gelombang optik 950 nm dan 850 nm [9].

## 2.3. Blok Sistem ROF dan FSO

Analisis kinerja sistem ROF dan FSO dalam penelitian ini diukur secara simulasi menggunakan software OptiSystem. Kinerja sistem diukur dengan mengukur nilai Q factor dari kedua sistem pada jarak 0 sampai 5 km dengan kenaikan panjang sebesar 0,1 km. Pengukuran dilakukan dengan dua skenario yaitu menggunakan laser 0 dBm dan 10 dBm. Blok sistem FSO dan ROF yang akan diukur dapat dilihat pada Gambar 4. Gambar 4a merupakan blok sistem ROF yang terdiri atas pembangkit data, modulator QAM, modulator optik, kanal fiber, demodulator

optik, demodulator QAM dan data diterima. Adapun blok dari sistem FSO dapat dilihat pada Gambar 4b. Pada prinsipnya, sistem FSO mirip seperti sistem ROF. Hanya saja kanal pada sistem FSO adalah berupa udara bebas.



Gambar 4. Blok sistem (a) ROF dan (b) FSO.

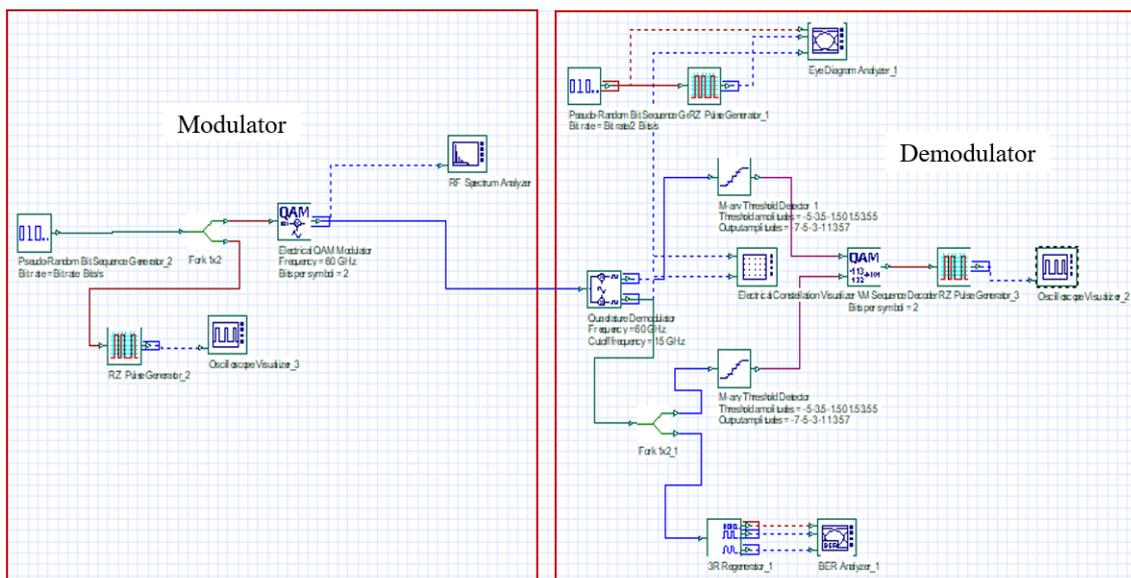
2.4. Simulasi Sistem ROF dan FSO

Untuk melakukan simulasi sistem ROF dan FSO, maka perlu dilakukan beberapa tahap perancangan yaitu:

1. Perancangan Modulator dan Demodulator QAM.
2. Perancangan Modulator dan Demodulator Optik.
3. Perancangan sistem ROF dan FSO.

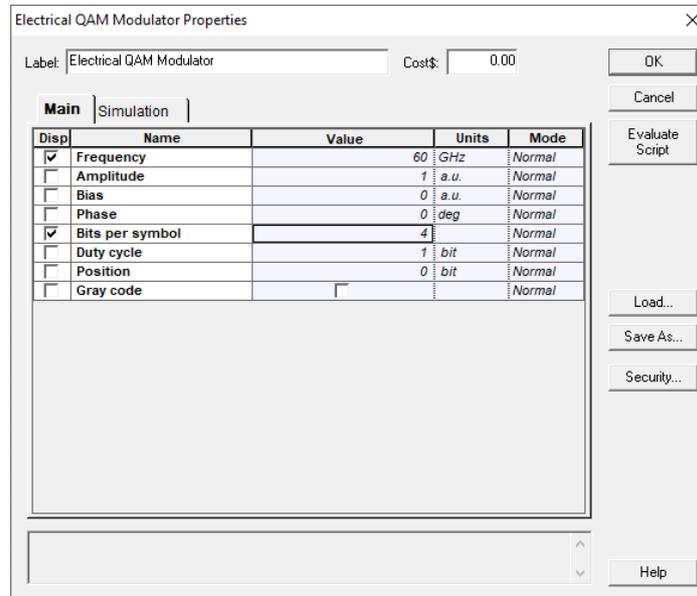
2.4.1. Perancangan Modulator dan Demodulator QAM

Tahap awal dari pembuatan rangkaian simulasi sistem ROF dan FSO dalam penelitian ini adalah dengan merancang rangkaian *modulator* dan *demodulator* (modem) QAM. Rancangan rangkaian modem QAM yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 5. Pada rangkaian ini, sinyal informasi digital dimodulasi secara QAM. Keluaran modulator kemudian langsung didemodulasi menggunakan demodulator QAM. Jika bentuk sinyal hasil demodulasi sama dengan sinyal informasi yang dikirimkan, berarti pengaturan parameter modem QAM sudah benar.



Gambar 5. Rangkaian *modulator* dan *demodulator* QAM.

Rangkaian *modulator* terdiri atas *Pseudo Random Bit Sequence* (PRBS) yang berfungsi sebagai pembangkit sinyal informasi digital (1 dan 0) [10]. Besarnya nilai bit yang akan dikirim diatur di dalam blok ini. Keluaran PRBS kemudian diubah menjadi sinyal listrik dengan level tegangan yang berbeda (*line coding*) menggunakan blok *RZ pulse generator* [11]. Sinyal keluaran *RZ pulse generator* kemudian diubah menjadi sinyal QAM menggunakan *Electrical QAM Modulator*. Pada blok *Electrical QAM Modulator* dapat diatur besarnya frekuensi RF yang akan digunakan dan nilai *bits per symbol* untuk menghasilkan jenis modulasi QAM yang diinginkan (4-QAM, 16-QAM atau 64-QAM). Pengaturan parameter blok ini dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 5. Pengaturan nilai *bits per symbol* untuk menghasilkan beberapa jenis modulasi QAM.

Pada Gambar 6, nilai *Bits per symbol* diubah menjadi 2 untuk menghasilkan modulasi 4-QAM, sedangkan untuk modulasi 16-QAM dan 64-QAM, nilai *Bits per symbol* diatur sebesar 4 dan 6. Adapun nilai parameter lainnya yang digunakan pada rangkaian modulator dan demodulator QAM dapat dilihat pada Tabel 1.

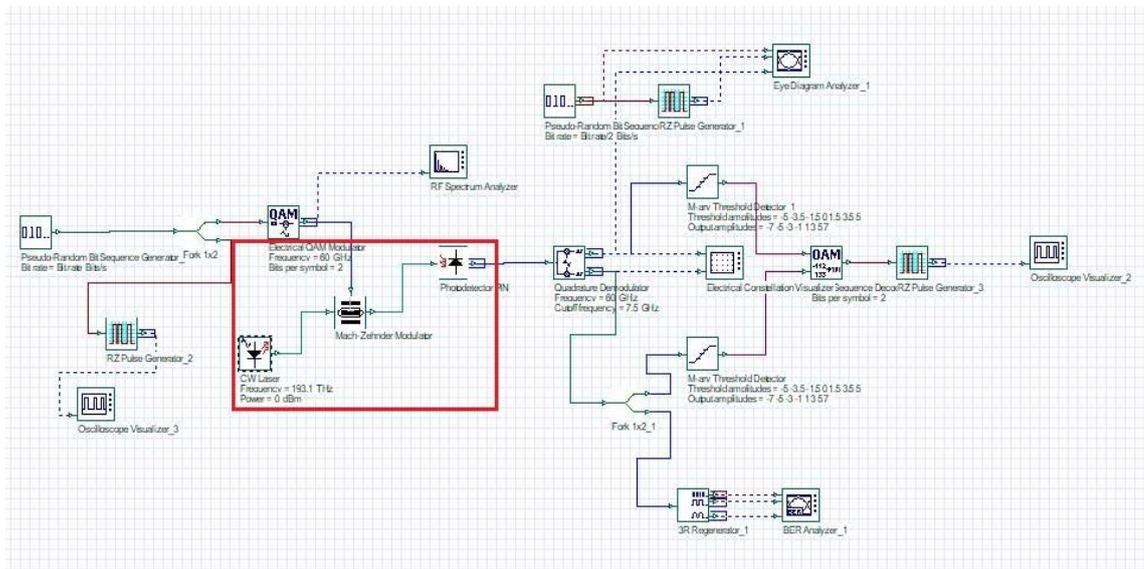
Tabel 1. Nilai parameter komponen modem QAM.

Perangkat	Parameter	Nilai
<i>PRBS Generator</i>	<i>Bitrate</i>	10 Gbps
<i>RZ Pulse Generator</i>	<i>Line Coding</i>	<i>Pulse Generator</i>
<i>QAM Modulator</i>	<i>Frequency</i>	60 GHz
	Bits per Simbol	2,4,6
<i>QAM Demodulator</i>	<i>Phazse</i>	0°
	<i>Frequency</i>	60 GHz
	<i>Cut off Frequency</i>	15 Hz

#### 2.4.2. Perancangan *Modulator* dan *Demodulator* Optik

Setelah dilakukan perancangan modem QAM, tahap berikutnya adalah melakukan perancangan modulator dan demodulator optik. Modulator optik merupakan komponen atau blok yang berfungsi untuk mengubah sinyal listrik menjadi sinyal optik sebelum ditransmisikan melalui serat optik ataupun udara bebas [12]. Sedangkan Demodulator optik adalah komponen yang berfungsi untuk mengubah sinyal optik menjadi sinyal listrik kembali [13]. Modem optik disisipkan diantara modem QAM seperti pada Gambar 7. Pada rangkaian ini, sinyal optik yang dibangkitkan oleh CW Laser dimodulasi oleh sinyal listrik keluaran modulator QAM. Modulator

optik yang digunakan adalah *Mach Zehnder Modulator* (MZM). Sinyal optik termodulasi kemudian langsung dideteksi (demodulasi) menggunakan *Photodetector* PIN. Sinyal listrik keluaran PIN kemudian didemodulasi oleh demodulator QAM. Jika sinyal keluaran demodulator QAM sudah sama dengan sinyal informasi yang dikirimkan berarti pengaturan parameter modem optik yang dilakukan sudah benar. Pengaturan parameter modem optik dapat dilihat pada Tabel 2.



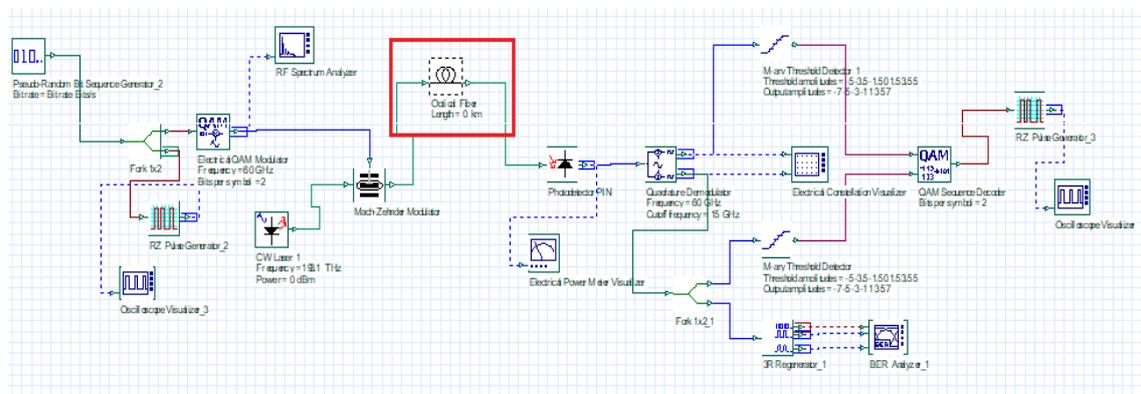
Gambar 7. Rangkaian modulator dan demodulator optik.

Tabel 2. Nilai parameter komponen modem optik.

Perangkat	Parameter	Nilai
CW Laser	Panjang gelombang	1550 nm
	Power	0 dBm dan 10 dBm
PIN Photodetector	Responsivity	1 A/W

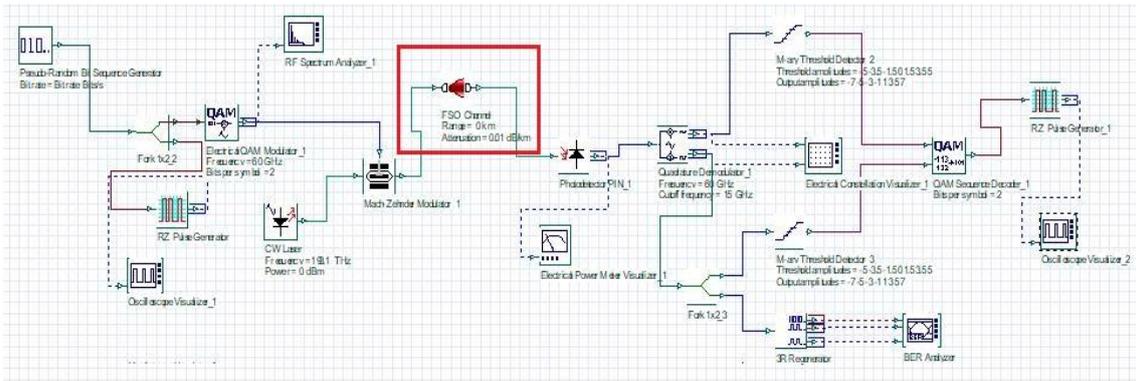
2.4.3. Perancangan Sistem ROF dan FSO

Sistem ROF dalam simulasi ini dibangun dengan menyisipkan blok *optical fiber* diantara modulator dan demodulator optik. Gambar rangkaian sistem ROF yang dirancang dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 8. Saluran fiber optik yang digunakan mempunyai *attenuation* sebesar 0,2 dB/km.



Gambar 8. Rangkaian sistem ROF.

Adapun sistem FSO dalam penelitian ini dibangun dengan menyisipkan blok *FSO Channel* diantara modulator dan demodulator optik seperti yang terlihat pada Gambar 9. Pada sistem FSO ini nilai *attenuation* dari *FSO channel* diatur sebesar 0,19 dB/km (kondisi cuaca cerah). Penggunaan *attenuation* sebesar 0,19 dBm/km mengacu pada standar *Recommendation* ITU-R P.1817-1 [14]. Nilai parameter dari blok optical fiber dan *FSO Channel* yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 3.



Gambar 9. Rangkaian sistem FSO.

Nilai parameter umum untuk simulasi sistem ROF dan FSO dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 3. Nilai parameter perangkat *Optical Fiber* dan *FSO Channel*.

Perangkat	Parameter	Nilai
<i>Optical Fiber</i>	<i>Length</i>	0,1-2 km
	<i>Reference Wavelength</i>	1550 nm
	<i>Attenuation</i>	0,2 dB/km
<i>FSO Channel</i>	<i>Length</i>	0,1-2 km
	<i>Reference Wavelength</i>	1550 nm
	<i>Attenuation</i>	0,19 dB/km

Tabel 4. Parameter umum simulasi sistem ROF dan FSO.

Nama	Nilai	Satuan
<i>Bit rate</i>	1000000000	Bits/s
<i>Time window</i>	2.048e-007	s
<i>Sample rate</i>	640	GHz
<i>Sequence length</i>	2048	Bits
<i>Samples per bit</i>	64	-
<i>Number of samples</i>	131072	-

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1. Hasil Perancangan *Modulator* dan *Demodulator* QAM

Hasil dari perancangan *modulator* dan *demodulator* QAM dapat dilihat pada Gambar 10, 11 dan 12. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa sinyal informasi yang diterima sama dikirim. Ini berarti pengaturan parameter *modulator* dan *demodulator* QAM yang dibuat sudah benar.



Gambar 10. Hasil simulasi modem 4-QAM (a) Sinyal dikirim, (b) Sinyal diterima.



Gambar 11. Hasil simulasi modem 16-QAM (a) Sinyal dikirim, (b) Sinyal diterima.



Gambar 12. Hasil simulasi modem 64-QAM (a) Sinyal dikirim, (b) Sinyal diterima.

### 3.2. Hasil Perancangan *Modulator* dan *Demodulator* Optik

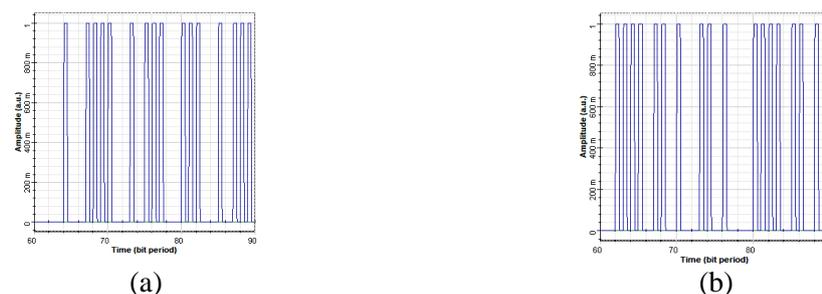
Hasil simulasi *modulator* dan *demodulator* optik dapat dilihat pada Gambar 13, 14, dan 15. Dari Gambar 13 dapat dilihat bahwa bentuk sinyal yang diterima pada modulasi 4-QAM sama dengan bentuk sinyal yang dikirim. Sedangkan Gambar 14 dan 15 menunjukkan bahwa bentuk sinyal yang diterima pada modulasi 16-QAM dan 64-QAM tidak sama dengan bentuk sinyal yang dikirim.



Gambar 13. Hasil simulasi modem optik dengan input sinyal RF termodulasi 4-QAM (a) Sinyal dikirim, (b) Sinyal diterima.



Gambar 14. Hasil simulasi modem optik dengan input sinyal RF termodulasi 16-QAM  
(a) Sinyal dikirim, (b) Sinyal diterima.



Gambar 15. Hasil simulasi modem optik dengan input sinyal RF termodulasi 64-QAM  
(a) Sinyal dikirim, (b) Sinyal diterima.

Hasil simulasi ini menunjukkan bahwa modulasi 16-QAM dan 64-QAM tidak mendukung untuk sistem komunikasi optik dengan frekuensi 60 GHz. Hal ini dikarenakan adanya ketidaklinieran modulator MZM, dimana semakin banyak jumlah *symbol* pada modulasi QAM maka sistem semakin sensitif terhadap ketidaklinieran. Dengan alasan ini maka pada analisis berikutnya jenis modulasi 16-QAM dan 64-QAM tidak dilakukan.

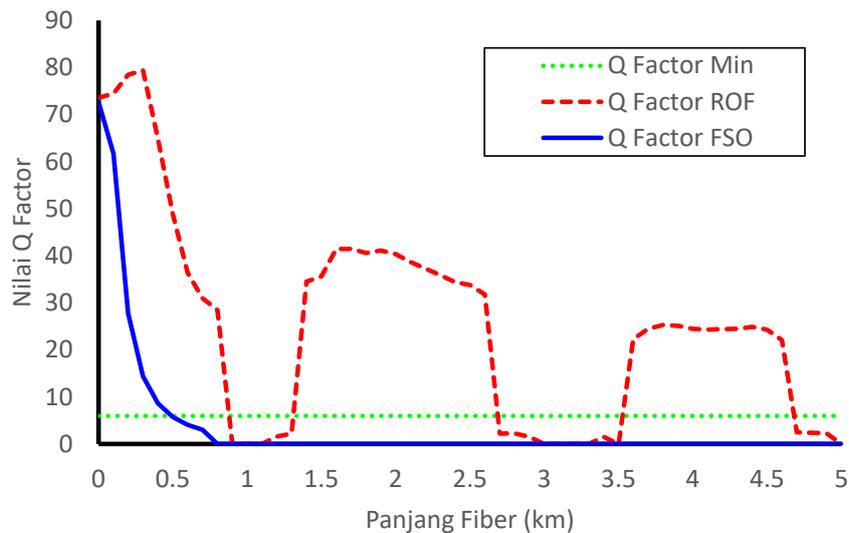
### 3.3 Hasil Pengukuran *Q-Factor* Sistem RoF dan FSO

Perbandingan nilai *Q-Factor* sistem ROF dan FSO untuk daya laser 0 dBm dan 10 dBm dapat dilihat pada Gambar 16 dan 17. Pada kedua gambar tersebut, sumbu vertikal menyatakan nilai *Q-Factor* sedangkan sumbu horizontal menyatakan panjang kanal (km). Kurva dengan garis putus-putus berwarna merah merupakan kurva *Q-Factor* untuk kanal fiber, dan yang solid berwarna biru untuk kanal FSO. Titik-titik berwarna hijau menyatakan nilai *Q-Factor* minimum yaitu 6.

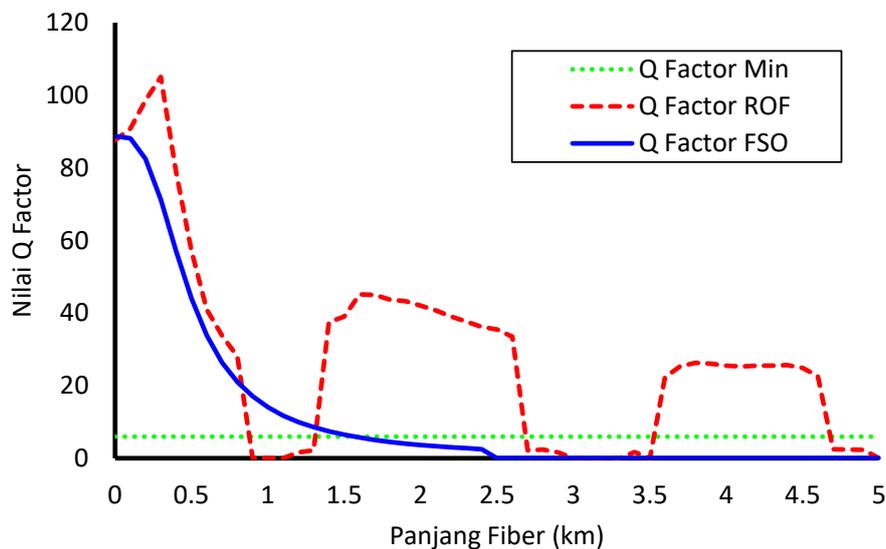
Perbandingan kinerja sistem ROF dan FSO untuk sistem dengan daya laser 0 dBm ditunjukkan pada Gambar 16. Dari kurva tersebut dapat dilihat bahwa kinerja sistem ROF berfluktuasi dimana kinerja sistem berada di bawah standar (nilai *Q Factor* < 6) pada panjang fiber 0,9 – 1,3 km, 2,7 – 3,5 km, dan 4,7 – 5 km. Hal ini berarti kinerja sistem ROF sebanding dengan kurva daya sinyal RF yang ditunjukkan pada Gambar 2. Pada sistem FSO, terlihat bahwa kinerja sistem semakin menurun seiring dengan bertambahnya jarak antara CO dan RAP. Kinerja sistem berada di bawah standar saat jarak  $\geq 0,5$  km. Hal ini berarti kinerja sistem FSO sebanding dengan fenomena daya yang ditunjukkan pada Gambar 3. Berdasarkan kurva pada Gambar 16 dapat dikatakan bahwa ingin menggunakan sistem ROF dengan daya laser sebesar 0 dBm sebagai penghubung antara CO dan RAP, maka harus dihindari penggunaan fiber dengan panjang 0,9 – 1,3 km, 2,7 – 3,5 km, dan 4,7 – 5 km. Sedangkan jika menggunakan sistem FSO maka jarak maksimum antara CO dan RAP yang diperkenankan adalah sebesar 0,5 km.

Perbandingan kinerja sistem ROF dan FSO untuk sistem dengan daya laser 10 dBm ditunjukkan pada Gambar 17. Kinerja sistem ROF berfluktuasi seperti pada saat menggunakan daya laser 0 dBm, dimana kinerja sistem berada di bawah standar (nilai *Q Factor* < 6) pada panjang fiber 0,9 – 1,3 km, 2,7 – 3,5 km, dan 4,7 – 5 km. Hal ini berarti kinerja sistem ROF

sebanding dengan kurva daya sinyal RF yang ditunjukkan pada Gambar 2. Selain itu dapat disimpulkan bahwa penambahan daya laser tidak meningkatkan kinerja sistem ROF. Pada sistem FSO, terlihat bahwa kinerja sistem juga semakin menurun seiring dengan bertambahnya jarak antara CO dan RAP. Kinerja sistem berada di bawah standar saat jarak  $\geq 1,6$  km. Hal ini berarti kinerja sistem FSO sebanding dengan fenomena daya yang ditunjukkan pada Gambar 3. Hal ini juga menunjukkan bahwa kinerja sistem FSO dapat meningkat dengan meningkatkan daya laser. Berdasarkan pengukuran ini dapat dikatakan bahwa panjang fiber yang perlu dihindari jika menggunakan laser dengan daya sebesar 10 dBm sama dengan saat menggunakan laser 0 dBm. Sedangkan pada sistem FSO dengan daya laser sebesar 10 dBm, jarak maksimum antara CO dan RAP yang diizinkan adalah sebesar 1,6 km.



Gambar 16. Grafik perbandingan  $Q$ -Factor dari sistem RoF dan FSO pada input daya laser 0 dBm.



Gambar 17. Grafik perbandingan  $Q$ -Factor dari sistem RoF dan FSO pada input daya laser 10 dBm.

#### 4. Kesimpulan

Dalam jurnal ini dilakukan perbandingan kinerja sistem RoF dan FSO dengan input berupa sinyal RF termodulasi QAM. Dari hasil simulasi diketahui bahwa hanya modulasi 4-QAM yang mendukung untuk sistem komunikasi optik. Pada sistem RoF dengan input sinyal RF termodulasi

QAM, kinerja sistem berfluktuasi sebanding dengan fluktuasi daya sistem ROF yang disebabkan oleh dispersi kromatik fiber. Panjang fiber yang perlu dihindari untuk sistem ROF dengan daya laser 0 dan 10 dBm adalah sama yaitu pada panjang fiber 0,9 – 1,3 km, 2,7 – 3,5 km, dan 4,7 – 5 km. Pada sistem FSO, jika daya laser yang digunakan adalah 0 dBm, maka jarak maksimum antara CO dan RAP yang diizinkan adalah 0,5 km. Sedangkan jika daya laser ditingkatkan menjadi 10 dBm, maka jarak antara CO dan RAP yang diizinkan meningkat menjadi 1,6 km. Ini berarti kinerja sistem FSO dapat ditingkatkan dengan menaikkan daya laser.

## Referensi

- [1] X. N. Fernando, *Radio over fiber for wireless communications: from fundamentals to advanced topics*. John Wiley & Sons, 2014.
- [2] S. A. Al-Gailani *et al.*, "A survey of free space optics (FSO) communication systems, links, and networks," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 7353-7373, 2020.
- [3] G. M. Bonner, B. E. Jones, M. S. Warden, and L. J. McKnight, "Free-space optical links for terrestrial communications and quantum key distribution," in *Free-Space Laser Communications XXXVI*, 2024, vol. 12877: SPIE, p. 128770U.
- [4] Y. Zhu and W. Hu, "Optical access networks for fixed and mobile applications [Invited Tutorial]," *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 16, no. 2, pp. A118-A135, 2024.
- [5] F. Ujang, T. Firmansyah, P. S. Priambodo, and G. Wibisono, "Irregular shifting of RF driving signal phase to overcome dispersion power fading," in *Photonics*, 2019, vol. 6, no. 4: MDPI, p. 104.
- [6] O. Widaryana, G. Hendratoro, and A. Mauludiyanto, "Kinerja Sistem Komunikasi FSO (Free Space Optics) Menggunakan Cell-site Diversity di Daerah Tropis," *Jurnal Teknik ITS*, vol. 1, no. 1, pp. A37-A43, 2012.
- [7] F. Dheaputro, Y. S. Rohmah, and A. D. Pambudi, "Perancangan Simulator Modulasi Dan Demodulasi 16 Qam Dan 64 Qam Menggunakan Labview," *eProceedings of Applied Science*, vol. 1, no. 2, 2015.
- [8] N. J. Gomes, P. P. Monteiro, and A. Gameiro, *Next generation wireless communications using radio over fiber*. John Wiley & Sons, 2012.
- [9] H. Kashif, M. N. Khan, and A. Altalbe, "Hybrid optical-radio transmission system link quality: link budget analysis," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 65983-65992, 2020.
- [10] L. Ananta, M. Rosmiati, and M. Fachru Rizal, "Simulasi Peningkatan Keamanan Jaringan Menggunakan Kombinasi Penguat Sinyal Optik," *eProceedings of Applied Science*, vol. 3, no. 3, 2017.
- [11] A. F. Kasmar, "Line Coding dan Kegunaannya," *Bandung: Institut Teknologi Bandung*, 2016.
- [12] R. Singh, M. Ahlawat, and D. Sharma, "Study and performance evaluation of Radio over Fiber using Mach Zehnder Modulator," *International Journal of Advanced Research in Computer Science*, vol. 8, no. 5, pp. 1095-1100, 2017.
- [13] Z. Ghassemlooy, W. Popoola, and S. Rajbhandari, *Optical wireless communications: system and channel modelling with Matlab®*. CRC press, 2019.
- [14] "Propagation data required for the design of terrestrial free-space optical links Policy on Intellectual Property Right (IPR)", *Recommendation ITU-R P.1817-1*, vol. 1, p. 17, 2012.