

Performansi SCM/WDM Radio Over Fiber dengan Arsitektur PON menggunakan M-ary PSK

Rika Susanti¹, Gusmawandi², Sutoyo³, Fitri Amilia⁴

Jurusan Teknik Elektro Fakultas Sains dan Teknologi UIN Suska Riau
e-mail: rika.susanti@uin-suska.ac.id

Abstrak

Teknologi Radio Over Fiber merupakan teknologi yang menggabungkan jaringan akses fiber dengan sistem wireless. Teknologi ini mampu memberikan fleksibilitas dan keandalan yang tinggi. Dengan menggunakan Sub Carrier Multiplexing dan Wavelength Division Multiplexing akan diperoleh sistem dengan bandwidth dan kapasitas yang besar, sedangkan arsitektur PON digunakan untuk mendistribusikan kanal. Sistem Radio over Fiber SCM/WDM-PON pada penelitian sebelumnya menerapkan teknik modulasi ASK dan QPSK. Pada penelitian ini dilakukan analisis performansi sistem dengan menggunakan modulasi M-ary PSK. Penentuan split ratio maksimum dan Minimum Required Power system merupakan dua skenario yang dilakukan pada penelitian ini. Dari hasil simulasi diperoleh bahwa semakin tinggi orde M-ary dan jarak jangkauan transmisinya, maka semakin kecil pula kemampuan split ratio-nya. Semakin besar split ratio yang digunakan, maka semakin kecil nilai Minimum Required Power sistem.

Kata kunci: Radio over Fiber, Sub Carrier Multiplexing, Wavelength Division Multiplexing, Passive Optical Network, M-ary PSK

Abstract

Radio over Fiber technology is hybrid technologies which combine optical and wireless system. It provides flexible and reliable network. Sub Carrier Multiplexing and Wavelength Division Multiplexing that was implemented in this paper will provide high capacity and high bandwidth system. Passive Optical Network architecture was added in order to distribute the channels. Previous research were proposed SCM/WDM-PON by using ASK and QPSK modulation schemes. While this paper was simulated and analyzed the implementation of M-ary PSK in SCM/WDM-PON Radio over Fiber system. The research scenarios of split ratio maximum and minimum required power system have been done. Based on the simulation result, the increasing numbers of orde modulation and transmission distance will reduce the number of split ratio system. In addition, the higher number of split ratio will reduce Minimum Required Power system as well.

Keywords: Radio over Fiber, Sub Carrier Multiplexing, Wavelength Division Multiplexing, Passive Optical Network, M-ary PSK

1. Pendahuluan

Seiring dengan berjalannya waktu, kebutuhan akan komunikasi semakin meningkat. Dewasa ini, kebutuhan akan layanan komunikasi sudah menjadi kebutuhan dasar bagi masyarakat di berbagai bidang kehidupan. Dalam rangka memenuhi kebutuhan pengguna, diperlukan jaringan yang andal yang dapat menyediakan jaringan dengan *bandwidth* dan kapasitas yang besar. Untuk menjawab kebutuhan tersebut, jaringan akses fiber dapat dijadikan sebagai solusinya.

Pada dasarnya yang dibutuhkan pengguna layanan komunikasi adalah tersedianya layanan yang dapat memberikan kecepatan akses yang tinggi, kapan saja dan dimana saja, dan dalam bentuk layanan apapun. Penggabungan sistem komunikasi *wireless* yang fleksibel dan sistem komunikasi optik yang andal melahirkan teknologi yang dikenal dengan *Radio over Fiber* (RoF). Menurut Anindya, dkk (2013) Sistem RoF merupakan salah satu skema yang menjanjikan untuk sistem komunikasi *wireless broadband* masa depan. RoF dapat memberikan *bandwidth* besar, atenuasi rendah, biaya murah dan kekebalan terhadap gangguan frekuensi radio (Ajay kumar, 2012).

Sub Carrier Multiplexing (SCM) merupakan suatu teknik *multiplexing* yang digunakan dalam ROF, dimana beberapa sinyal *demultiplexing* dalam domain radio frekuensi dan

ditransmisikan pada satu panjang gelombang (Ajay kumar, dkk, 2012). SCM mampu memberikan efisiensi terhadap *bandwidth* dan daya transmisi (Muchrizam, 2012).

Wavelength Division Multiplexing (WDM) digunakan dalam sistem transmisi serat optik yang menggabungkan beberapa panjang gelombang sehingga dapat dikirimkan secara bersamaan dalam satu serat optik. E. J. Tyler (2003) mengkombinasikan SCM dan WDM pada serat *multimode* untuk menghasilkan kapasitas *Terabit per second* dengan *channel spacing* 20 GHz.

Arief Marwanto, dkk (2008) meneliti tentang SCM/WDM pada RoF, lalu Xiaong Huang (2013) meneliti tentang sistem SCM/WDM pada *Ultra WideBand* (UWB) RoF untuk 60 GHz. Hasil penelitian keduanya menunjukkan adanya efisiensi *bandwidth* pada jaringan, dapat menghasilkan *bit rate* yang besar, dan mobilitas yang tinggi dengan penggunaan SCM/WDM tersebut.

Passive Optical Network (PON) muncul sebagai teknologi akses yang menawarkan fleksibilitas, cakupan wilayah yang luas dan hemat biaya untuk jaringan *point to multipoint* (R. Susanti, 2011). Berdasarkan standar ITU-T G.984.1 tahun 2008, teknologi GPON mendukung semua layanan *transport* dan dapat meningkatkan keandalan jaringan akses yang tersedia. Di samping itu GPON juga mendukung *split ratio* hingga 1:128, sehingga memberikan fleksibilitas jaringan yang tinggi dalam mendistribusikan kanal (ITU-T, 2008).

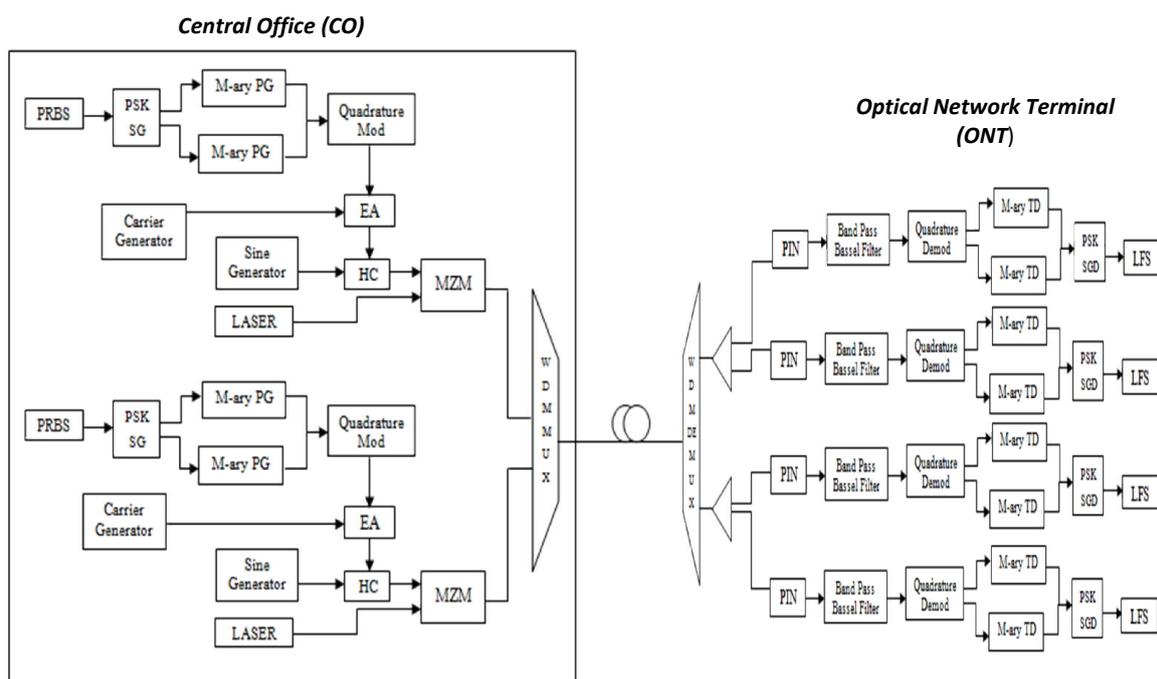
Teknologi GPON dapat digunakan untuk *Distributed Antenna System* (DAS). R. Susanti, dkk (2011) mendisain jaringan RoF dengan arsitektur GPON untuk pendistribusian *Remote Base Station* (RBS) 4G. Penelitian tersebut menggunakan SCM dalam memultiplekskan sinyal *subcarrier*, dimana sinyal informasinya dimodulasi dengan menggunakan teknik modulasi *Amplitude Shift Keying* (ASK).

Rakesh Chandan, dkk (2013) berhasil merancang jaringan SCM/WDM pada RoF di dalam pendistribusian *Base Station* (BS) dengan menggunakan arsitektur PON. Penelitian tersebut mengkaji tentang performansi sistem terhadap beberapa variasi jarak transmisi dan jumlah *subcarrier*. Sri Mayanti (2015) juga menganalisis tentang jaringan SCM/WDM pada RoF dengan menggunakan arsitektur PON. Sri memberikan rekomendasi terhadap *channel spacing* minimum pada WDM dan *split ratio* maksimum pada *splitter* yang bisa diterapkan pada model sistem. Kedua penelitian tersebut menggunakan modulasi *Quadrature Phase Shift Keying* (QPSK) pada model jaringannya.

Penggunaan teknik modulasi pada sistem mempengaruhi laju kesalahan data (Aditya Ananta, 2009). Melihat pengaruh teknik modulasi terhadap laju kesalahan data, maka pada penelitian ini dilakukan analisis terhadap performansi jaringan SCM/WDM *Radio over Fiber* dengan arsitektur PON menggunakan teknik modulasi *Phase Shift Keying* (PSK) dengan beberapa orde (M-ary PSK), yaitu QPSK, 8PSK, 16PSK, 32PSK, dan 64PSK.

2. Metodologi Penelitian

Pada penelitian ini dilakukan pemodelan dan simulasi jaringan *Subcarrier Multiplexing/Wavelength Division Multiplexing* (SCM/WDM) *Radio over Fiber* (RoF) dengan arsitektur *Passive Optical Network* (PON) dengan menggunakan program aplikasi Optisystem. *Software* ini merupakan perangkat lunak yang komprehensif dimana kita dapat mendesain, mensimulasikan dan menguji sebuah jaringan optik. *Software* ini juga dilengkapi dengan *virtual instrument* sehingga kita dapat menggunakan *tool* tersebut untuk melakukan penelitian tanpa terkendala peralatan dan biaya. Gambar berikut menampilkan blok diagram model jaringan SCM/WDM RoF dengan arsitektur PON.



Gambar 1. Model Jaringan SCM/WDM RoF dengan Arsitektur PON

Sinyal informasi dibangkitkan dengan menggunakan *Pseudo Random Bit Sequence* (PRBS) dengan *bit rate* 2,4 Gbps, sesuai dengan standar ITU-T G.984.1 tahun 2008. Sinyal informasi tersebut dimodulasi dengan menggunakan *M-ary PSK* (BPSK, QPSK, 8-PSK, 16-PSK, 32-PSK, dan 64-PSK). *Electrical adder* berfungsi untuk menggabungkan sinyal informasi yang telah dimodulasi dengan sinyal *carrier* yang dihasilkan oleh *Carrier Generator* (CG). Beberapa *subcarrier* akan *demultiplex* pada bagian ini. Frekuensi yang digunakan pada SCM menggunakan frekuensi *International Mobile Telecommunication* (IMT) yaitu 1920-1980 MHz, dengan jarak frekuensi antar kanal sebesar 200 kHz. Sinyal-sinyal tersebut dibawa dengan sinyal Radio Frekuensi (RF) yang dikopelkan dengan menggunakan *Hybrid Coupler* (HC) dan diteruskan ke *Mach Zehnder Modulator* (MZM).

MZM merupakan modulator optik eksternal yang berfungsi menumpangkan sinyal elektrik keluaran HC ke sinyal optik keluaran *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (Laser). Laser yang digunakan bekerja pada panjang gelombang 1552,52 nm (laser 1) dan 1552,32 nm (laser 2), mengikuti standar ITU-T G.694.1 tahun 2009-2012 untuk sistem WDM. Sinyal-sinyal optik keluaran dari MZM yang dimultipleks dengan *WDM Multiplexer* (WDM Mux), kemudian ditransmisikan melalui serat optik jenis *step indeks singlemode*. Jenis serat optik ini dipilih karena serat optik jenis ini dapat digunakan untuk transmisi data dengan *bit rate* yang tinggi, mempunyai kapasitas *bandwidth* besar dan jarak yang jauh karena memiliki *loss* yang kecil. Panjang serat optik yang digunakan pada model sistem akan disimulasikan untuk dua jarak yang berbeda, yaitu 10 km dan 20 km. Jarak ini digunakan karena GPON menawarkan dua pilihan jarak tersebut di dalam implementasinya

Sinyal optik yang ditransmisikan melalui serat optik kemudian didemultipleks dengan menggunakan *WDM Demultiplexer* (WDM Demux). *Splitter* membagi sinyal optik ke beberapa penerima *Optical Network Terminal* (ONT). Pada masing-masing ONT, sinyal optik dideteksi oleh *photodetector* PIN dan mengubah sinyal optik tersebut kembali menjadi sinyal elektrik. Selanjutnya sinyal elektrik tersebut diteruskan ke *band pass bessed filter* dan didemodulasi. Selanjutnya sinyal tersebut difilter kembali dengan menggunakan *low pass filter* untuk mendapatkan sinyal informasi sesuai dengan frekuensi yang diinginkan.

Analisis performansi jaringan SCM/WDM *Radio over Fiber* dengan arsitektur PON menggunakan teknik modulasi *M-ary PSK* dilakukan dengan dua skenario penelitian, yaitu menentukan split ratio maksimum dan menentukan *Minimum Required Power* Sistem.

3. Hasil dan Pembahasan

Analisis performansi jaringan SCM/WDM *Radio over Fiber* dengan arsitektur PON menggunakan teknik modulasi M-ary PSK dilakukan dengan dua skenario penelitian, yaitu menentukan split ratio maksimum dan menentukan *Minimum Required Power* Sistem. Parameter yang digunakan untuk melihat kualitas performansi jaringan adalah *Bit Error Rate* (BER). BER merupakan perbandingan antara kemungkinan jumlah *bit* yang salah yang terdeteksi pada penerima terhadap jumlah bit yang dikirimkan.

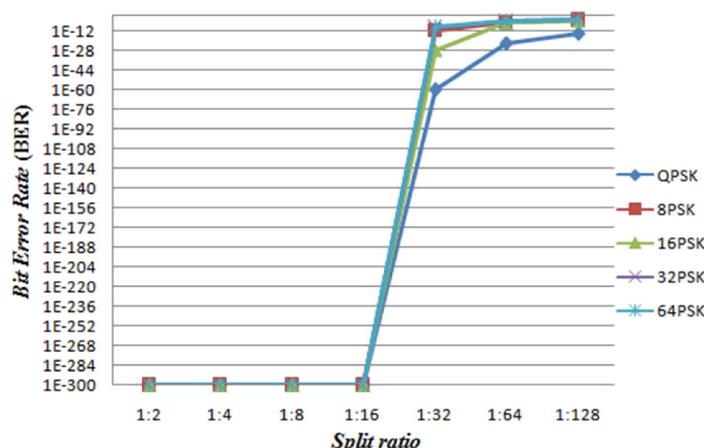
Nilai standar BER yang digunakan pada analisis performansi ini adalah 10^{-12} . Nilai ini dijadikan sebagai acuan, karena standar BER untuk teknologi GPON adalah 10^{-11} sedangkan untuk WDM adalah 10^{-12} . Jadi nilai BER minimum yang dijadikan acuan pada model sistem ini adalah 10^{-12} .

3.1. Split Ratio Maksimum

Model tersebut disimulasikan dengan jarak 10 km dan 20 km. Tabel 1 dan Gambar 2 menampilkan Performansi BER model sistem terhadap *Split Ratio* untuk beberapa teknik modulasi M-ary PSK pada jarak 10 km.

Tabel 1. Performansi BER terhadap *Split Ratio* pada Jarak 10 km

| Teknik Modulasi | BER untuk split Ratio | | | | | | |
|-----------------|-----------------------|-----|-----|------|-------------------------|------------------------|-------------------------|
| | 1:2 | 1:4 | 1:8 | 1:16 | 1:32 | 1:64 | 1:128 |
| QPSK | 0 | 0 | 0 | 0 | $6,213 \times 10^{-61}$ | $3,1 \times 10^{-23}$ | $2,753 \times 10^{-15}$ |
| 8PSK | 0 | 0 | 0 | 0 | $7,738 \times 10^{-13}$ | $1,806 \times 10^{-5}$ | $7,975 \times 10^{-4}$ |
| 16PSK | 0 | 0 | 0 | 0 | $1,044 \times 10^{-28}$ | $4,287 \times 10^{-6}$ | $3,375 \times 10^{-4}$ |
| 32PSK | 0 | 0 | 0 | 0 | $8,798 \times 10^{-11}$ | $2,677 \times 10^{-5}$ | $4,581 \times 10^{-4}$ |
| 64PSK | 0 | 0 | 0 | 0 | $2,725 \times 10^{-9}$ | $6,94 \times 10^{-5}$ | $3,671 \times 10^{-4}$ |



Gambar 2. Performansi BER terhadap *Split Ratio* pada Jarak 10 km

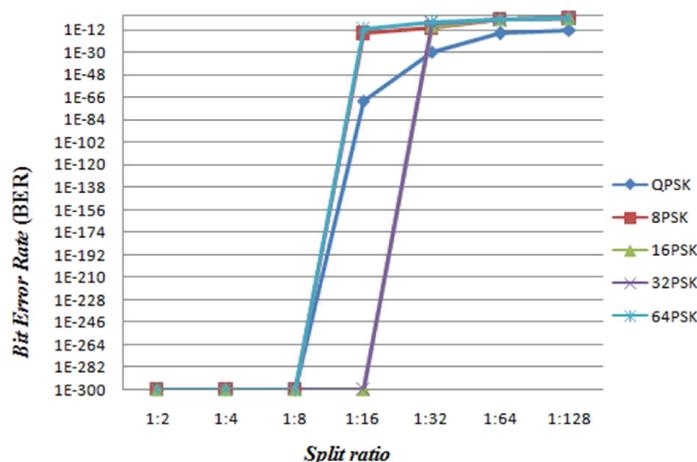
Berdasarkan Tabel 1 dan Gambar 2 di atas terlihat bahwa model sistem dengan *split ratio* 1:2, 1:4, 1:8 dan 1:16 pada jarak 10 km memenuhi standar untuk semua modulasi M-ary PSK, dimana BER sistem bernilai 0. Sementara model sistem untuk *split ratio* 1:32 hanya memenuhi standar untuk model sistem dengan modulasi QPSK, 8PSK, dan 16 PSK. Sedangkan untuk *split ratio* 1:64 dan 1:128 memenuhi standar hanya untuk model sistem dengan penggunaan modulasi QPSK.

Dalam skenario ini, model sistem SCM/WDM *Radio over Fiber* dengan menggunakan teknik modulasi QPSK dapat memenuhi standar maksimum *split ratio* dari ITU-T G.984, yaitu sebesar 1:128. Untuk model sistem dengan teknik modulasi 8PSK dan 16PSK hanya mampu mencapai *split ratio* 1:32. Sedangkan model sistem dengan teknik modulasi 32PSK dan 64PSK dapat memberikan performa yang baik hingga *split ratio* 1:16.

Performansi BER model sistem terhadap *Split Ratio* untuk beberapa teknik modulasi *M*-ary PSK pada jarak 20 km ditampilkan pada Tabel 2 dan Gambar 3 berikut.

Tabel 2. Performansi BER terhadap *Split Ratio* pada Jarak 20 km

| Teknik Modulasi | BER untuk split Ratio | | | | | | |
|-----------------|-----------------------|-----|-----|-------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|
| | 1:2 | 1:4 | 1:8 | 1:16 | 1:32 | 1:64 | 1:128 |
| QPSK | 0 | 0 | 0 | $9,089 \times 10^{-70}$ | $2,66 \times 10^{-30}$ | $1,32 \times 10^{-15}$ | $1,16 \times 10^{-12}$ |
| 8PSK | 0 | 0 | 0 | $1,037 \times 10^{-15}$ | $2,496 \times 10^{-11}$ | $4,343 \times 10^{-4}$ | $1,26 \times 10^{-3}$ |
| 16PSK | 0 | 0 | 0 | 0 | $1,575 \times 10^{-9}$ | $2,17 \times 10^{-4}$ | $1,08 \times 10^{-3}$ |
| 32PSK | 0 | 0 | 0 | 0 | $4,232 \times 10^{-7}$ | $1,036 \times 10^{-4}$ | $1,42 \times 10^{-3}$ |
| 64PSK | 0 | 0 | 0 | $8,817 \times 10^{-12}$ | $1,653 \times 10^{-6}$ | $1,905 \times 10^{-4}$ | $1,001 \times 10^{-3}$ |



Gambar 3. Performansi BER terhadap *Split Ratio* pada Jarak 20 km

Berdasarkan Tabel 2 dan Gambar 3 di atas, model sistem SCM/WDM *Radio over Fiber* pada jarak 20 km dapat memberikan nilai BER sebesar 0 untuk *split ratio* 1:2, 1:4 dan 1:8 untuk semua jenis teknik modulasi *M*-ary PSK yang diimplementasikan pada model sistem ini. Performansi BER model sistem yang menggunakan teknik modulasi QPSK mampu memberikan performansi sistem yang baik hingga mencapai *split ratio* 1:128.

Sementara untuk model sistem dengan teknik modulasi 8PSK, 16PSK, 32PSK, dan 64PSK hanya dapat memberikan performansi yang baik hingga *split ratio* 1:16. Sedangkan pada *split ratio* 1:32, 1:64 dan 1:128, performansi BER sistem sudah tidak memenuhi standar yang ditetapkan oleh ITU-T.

3.2. Minimum Required Power Sistem

Minimum Required Power (MRP) merupakan salah satu parameter penting untuk menentukan daya minimum yang dibutuhkan oleh sistem untuk menghasilkan besaran BER tertentu. MRP dapat ditentukan dengan mengukur daya output pada *photodetector* dengan menggunakan *optical power meter* yang terdapat pada *optisystem*. Pada penelitian ini, daya input diasumsikan bernilai 0 dBm. Tabel 3 berikut menampilkan daya output sistem pada jarak 10 km.

Tabel 3. Daya Output Sistem pada Jarak 10 km

| Teknik Modulasi | Daya Output (P-out) (dBm) | | | | | | |
|-----------------|---------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 1:2 | 1:4 | 1:8 | 1:16 | 1:32 | 1:64 | 1:128 |
| QPSK | -12,634 | -15,644 | -18,655 | -21,665 | -24,675 | -27,686 | -30,696 |
| 8PSK | -13,025 | -16,035 | -19,045 | -22,056 | -25,066 | | |
| 16PSK | -12,789 | -15,799 | -18,809 | -21,820 | -24,830 | | |
| 32PSK | -13,013 | -16,023 | -19,033 | -22,044 | | | |
| 64PSK | -13,038 | -16,048 | -19,057 | -22,069 | | | |

Berdasarkan tabel 3 di atas, model sistem dengan teknik modulasi QPSK untuk jarak 10 km, daya output yang diperoleh adalah -12,634 dBm untuk *split ratio* 1:2 dan -30,696 dBm

pada *split ratio* 1:128. Nilai BER yang diperoleh pada *split ratio* 1:128 adalah $2,753 \times 10^{-15}$ (dapat dilihat pada tabel 1 di atas). Jadi, untuk menghasilkan BER sebesar $2,753 \times 10^{-15}$ pada model sistem dengan menggunakan QPSK dengan *split ratio* 1:128 dibutuhkan daya sebesar -30,696 dBm pada *output* sistem. Sehingga *Minimum Required Power* (MRP) sistem adalah -30,696 dBm.

Split ratio maksimum model sistem dengan teknik modulasi 8PSK yang dapat memberikan performansi yang baik berdasarkan hasil simulasi skenario pertama adalah 1:32 dengan BER sebesar $7,738 \times 10^{-13}$. Daya output sistem pada *split ratio* 1:32 diperoleh sebesar -25,066 dBm. Jadi, daya minimal pada *photodetector* untuk menghasilkan BER sebesar $7,738 \times 10^{-13}$ pada model sistem dengan menggunakan teknik modulasi 8PSK dan *split ratio* 1:32 adalah -25,066 dBm.

Seperti halnya 8PSK, model sistem dengan teknik modulasi 16PSK juga hanya mampu memberikan performansi yang baik hingga *split ratio* 1:32 dengan BER $1,044 \times 10^{-28}$. Daya output sistem pada kasus ini diperoleh sebesar -24,830 dBm. Jadi, MRP sistem untuk menghasilkan BER sebesar $1,04362 \times 10^{-28}$ pada kasus ini adalah -24,830 dBm.

Untuk model sistem dengan teknik modulasi 32PSK dan 64 PSK hanya dapat memberikan performansi yang baik hingga *split ratio* 1:16 dengan BER 0. Daya output sistem dengan teknik modulasi 32PSK diperoleh sebesar -22,044 dBm, sedangkan daya output sistem dengan teknik modulasi 64PSK diperoleh sebesar -22,069 dBm. Jadi, MRP sistem untuk menghasilkan BER 0 dengan *split ratio* 1:16 pada model sistem dengan teknik modulasi 32PSK dan 64PSK adalah sekitar -22 dBm.

Tabel 4 berikut menampilkan daya output model sistem SCM/WDM *Radio over Fiber* pada jarak 20 km.

Tabel 4. Daya Output Sistem pada Jarak 20 km

| Teknik Modulasi | Daya Output (P-out) (dBm) | | | | | | |
|-----------------|---------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 1:2 | 1:4 | 1:8 | 1:16 | 1:32 | 1:64 | 1:128 |
| QPSK | -14,634 | -17,644 | -20,654 | -23,665 | -26,675 | -29,684 | -32,696 |
| 8PSK | -15,025 | -18,035 | -21,045 | -24,056 | | | |
| 16PSK | -14,788 | -17,799 | -20,809 | -23,820 | | | |
| 32PSK | -15,013 | -18,023 | -21,033 | -24,043 | | | |
| 64PSK | -15,038 | -18,048 | -21,057 | -24,069 | | | |

Berdasarkan hasil simulasi skenario pertama, *split ratio* maksimal model sistem dengan menggunakan teknik modulasi QPSK untuk jarak 20 km adalah 1:128 dengan BER sebesar $1,164 \times 10^{-12}$ (dapat dilihat pada Tabel 2 di atas). Berdasarkan tabel 4, daya output yang diperoleh untuk *split ratio* 1:128 adalah -32,696 dBm. Jadi, untuk menghasilkan BER sebesar $1,164 \times 10^{-12}$ pada model sistem dengan menggunakan QPSK dengan *split ratio* 1:128 dibutuhkan daya sebesar -32,696 dBm pada *output* sistem. Sehingga *Minimum Required Power* (MRP) sistem adalah -32,696 dBm.

Split ratio maksimum model sistem dengan teknik modulasi 8PSK, 16PSK, 32PSK, dan 64PSK berdasarkan skenario penelitian pertama adalah 1:16 dengan BER sebesar $1,038 \times 10^{-15}$ (untuk 8PSK), 0 (untuk 16PSK dan 32PSK), dan $8,818 \times 10^{-12}$ (untuk 64PSK). Daya output sistem diperoleh sebesar -24,056 dBm (untuk 8PSK), -23,820 dBm (untuk 16PSK), -24,043 dBm (untuk 32PSK), dan -24,069 dBm (untuk 64PSK). Sehingga, MRP sistem dengan teknik modulasi 8PSK, 16PSK, 32PSK, dan 64PSK dibutuhkan daya minimal sekitar -24 dBm pada *photodetector*.

Berdasarkan hasil simulasi, semakin banyak *split ratio* yang digunakan, maka daya output sistem akan semakin kecil. Hal ini terjadi karena semakin besar pembagian daya yang terjadi disebabkan banyaknya pemecahan (*split*) sinyal.

4. Kesimpulan

Model sistem SCM/WDM *Radio over Fiber* dengan teknik modulasi QPSK dapat memberikan performansi yang baik hingga *split ratio* maksimum 1:128, dengan MRP sistem sebesar -30,696 dBm pada jarak 10 km dan -32,696 dBm pada jarak 20 km. Model sistem dengan jarak 10 km dapat diimplementasikan hingga *split ratio* 1:32 dengan MRP sistem

sebesar -25,066 dBm (untuk 8PSK) dan -24,830 dBm (untuk 16PSK). Model sistem dengan jarak 10 km dapat diimplementasikan hingga *split ratio* 1:16 dengan MRP sistem sebesar -22,044 dBm (untuk 32PSK) dan -22,069 dBm (untuk 64PSK). Untuk jarak 20 km, model sistem dengan teknik modulasi 8PSK, 16PSK, 32PSK, dan 64PSK hanya dapat diimplementasikan hingga *split ratio* 1:16 dengan MRP sistem rata-rata sebesar -24 dBm. Dari penelitian ini diperoleh semakin tinggi orde M-ary dan jarak jangkauan transmisinya, maka semakin kecil pula kemampuan *split ratio*-nya. Semakin banyak *split ratio* yang digunakan, maka daya output sistem akan semakin kecil.

Daftar Pustaka

- [1] Aditya Ananta. Simulasi Perbandingan Kinerja Modulasi M-PSK dan M-QAM terhadap Laju Kesalahan Data pada Sistem Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM). Semarang: Universitas Diponegoro; 2009.
- [2] Ajay Kumar, et.al. Radio over Fiber: Future Technology of Communication. *International Journal of Emerging Trends & Technology in Computer Science (IJETTCS)*. 2012; Vol.1 (Issue. 2).
- [3] Anindya Sundar Das, et al. A Novel Radio over Fiber System for Long Haul Single-Mode-Fiber Transmission. *International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE)*. 2013; Vol. 3 (Issue. 1).
- [4] Arif Marwanto, et al. Broadband Radio Over Fiber Communication Employing SCM/WDM System. 2008.
- [5] E. J. Tyler, et a. Toward Terabit-per-Second Capacities Over Multimode Fiber Links Using SCM/WDM Techniques. *Journal Of Lightwave Technology*. 2003; Vol.21 (No.12).
- [6] ITU-T. Rec. G.984.1. *Gigabit-capable Passive Optical Networks (GPON): General Characteristics*. 2008.
- [7] Muchrizam, Analisis Performansi Semiconductor Optical Amplifier pada Jaringan Sub Carrier Multiplexing/Wavelength Division Multiplexing Radio Over Fiber. Laporan Tugas Akhir. Pekanbaru: Jurusan Teknik Elektro UIN Suska Riau; 2012.
- [8] Rakesh Chandan. Performance Analysis of Radio over Fiber with WDM PON System. *International Journal of Engineering Research*. 2013; Vol. 2 (Issue. 8).
- [9] Rika Susanti, et.al. Distribution of 4G Radio over Fiber on Gigabit Passive Optical Network Architecture. *Jurnal Teknologi, Universiti Teknologi Malaysia*. 2011.
- [10] Sri Mayanti. Performansi SCM/WDM Radio over Fiber dengan Arsitektur Gigabit Passive Optical Network. Laporan Tugas Akhir. Pekanbaru: Jurusan Teknik Elektro UIN Suska Riau; 2015.
- [11] Xiaong Huang, et al. Toward a High Capacity of 60-GHz Ultra-WideBand Radio over Fiber System Based on SCM/DWDM. *Journal in Science and Technology, Journal of Selected Areas in Telecommunications*. 2013; Vol. 3 (Issue. 7).