

# KINERJA *ORTHOGONAL FREQUENCY DIVISION MULTIPLE ACCESS* (OFDMA) PADA TEKNOLOGI RADIO OVER FIBER (ROF)

Amalia Eka Rakhmania<sup>[1]</sup>, Sholeh Hadi Pramono<sup>[2]</sup>, Dwi Fadila Kurniawan<sup>[2]</sup>

<sup>[1]</sup>Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Malang

<sup>[2]</sup>Jurusan Teknik Elektro, Universitas Brawijaya Malang

## ABSTRACT

*Amalia Eka Rakhmania, Sholeh Hadi Pramono, Dwi Fadila Kurniawan, in this paper explain that radio over Fiber (RoF) is a technology that integrates wireless and wireline transmission system to transmit radio signal through optical fibre cable. This paper evaluates the performance of Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) implemented in RoF system for mobile WiMAX network. RoF channel model includes both optical fiber with Relative Intensity Noise, shot noise, thermal noise, and chromatic dispersion, and also wireless channel with Additive White Gaussian Noise (AWGN). Through simulation, signal to noise ratio (SNR), channel capacity, bit rate, and bit error rate (BER) with the influence of optical fiber length and wavelength. Result shows that optical fiber length is proportional to SNR, channel capacity, and bit rate but inversely proportional to BER. 1550 nm wavelength has better channel capacity but lesser bit rate than 1310 nm.*

**Keywords:** noise; performance; OFDMA; radio over fiber; wavelength

## PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi telekomunikasi salah satunya ditunjukkan dengan perkembangan teknik transmisi data. Saat ini teknologi *wireless* merupakan teknologi yang sering digunakan, tetapi teknologi ini masih memiliki beberapa kekurangan, salah satunya adalah semakin tingginya *loss* ketika jarak transmisinya semakin jauh, adanya attenuasi akibat atmosfer [1], serta jarak jangkauan yang dibatasi oleh *cell coverage* masing-masing *base station* [2]. Teknologi *wireline*, misalnya serat optik, dapat menjangkau daerah yang jauh maupun area di dalam gedung, tetapi apabila penarikan kabel dari sentral terlalu jauh, dikhawatirkan mengalami rugi-rugi yang cukup tinggi. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, dikembangkan suatu teknologi penggabungan antara *wireless* dan *wireline*, yaitu teknologi *Radio over Fiber* (RoF).

Konsep RoF bertujuan untuk mengirimkan informasi melalui kabel serat optik dengan melakukan modulasi pada cahaya menggunakan sinyal radio[3]. Proses modulasi intensitas cahaya sumber laser tanpa mengubah format modulasi, walaupun proses ini hanya mungkin dilakukan pada fiber optik silika yang menawarkan *bandwidth* yang lebar [4]. Proses ini dilakukan pada *central gateway*, sehingga perangkat di dekat user lebih sederhana. Akibatnya, sistem RoF membutuhkan lebih sedikit biaya dibanding dengan sistem radio frekuensi tradisional [5].

RoF mendapat banyak perhatian karena banyaknya permintaan kapasitas maupun luasnya daerah cakupan serta pengembangan *base station* yang lebih sederhana. Meskipun demikian, ada beberapa kelemahan yang terdapat pada sistem RoF yaitu adanya distorsi nonlinier yang sebagian besar disebabkan oleh sifat nonlinier dari laser diode dan

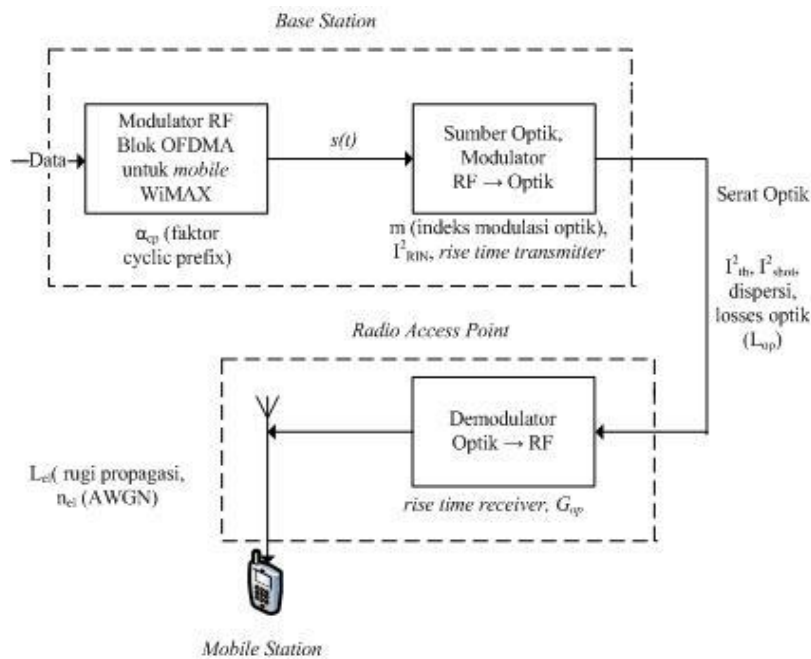
dispersi kromatik dari serat optik dan *noise* yang dibangkitkan oleh perangkat pengirim [6].

Integrasi OFDMA dengan RoF diharapkan dapat memberikan solusi untuk teknologi sebelumnya. Penelitian mengenai RoF lebih terfokus pada kinerja OFDM pada sistem RoF [1], [6]–[11]. Sedangkan [12] melakukan evaluasi sensitivitas penerima RoF terhadap sinyal OFDMA serta kinerja sinyal radio frekuensi. Integrasi OFDMA dengan *Wavelength Division Multiplexing* (WDM) dilihat dari resource allocation dievaluasi pada [13]. Untuk melakukan implementasi OFDMA pada RoF, sebelumnya harus diketahui seberapa baik kinerja OFDMA pada ROF. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja OFDMA pada RoF, dengan parameter performansi yang diamati yaitu *signal to noise ratio* (SNR), kapasitas kanal, *bit rate*, serta *bit error rate* sistem OFDMA pada *radio over fiber*.

## METODE PENELITIAN

Metode perhitungan dan analisis data yang digunakan pada penelitian ini adalah melalui pengambilan nilai parameter data sekunder dan melakukan pendekatan matematis melalui simulasi menggunakan *software*. Sistem yang akan dianalisa dilihat dari sisi *downlink* dan dimodelkan sesuai dengan Gambar 1.

Gambar 1 menggambarkan model sistem yang digunakan untuk analisis dalam penelitian ini. Performansi sistem dihitung di sisi *user* (*downlink*). Proses transmisi dari *central base station* menuju *radio access point* dihubungkan melalui serat optik. Rugi-rugi yang terjadi dalam serat optik diperlihatkan pada gambar. Rugi-rugi propagasi dan kanal *noise* AWGN terjadi ketika transmisi dilakukan dari *radio access point* ke *mobile station*. Gambar 1 juga memperlihatkan beberapa variabel yang digunakan dalam perhitungan sistem.



Gambar 1. Pemodelan Sistem

Algoritma perhitungan kinerja sistem dilakukan sesuai dengan parameter yang dihitung, yaitu SNR sistem, kapasitas kanal, *bit rate*, dan *bit error rate*.

**Algoritma 1. Perhitungan SNR Sistem**

1. Mulai dengan memasukkan nilai koefisien rugi-rugi optik  $\alpha$ , panjang serat optik  $l_f$ , bandwidth  $B$ , shot noise  $\langle I_{shot}^2 \rangle$ , relative intensity noise  $\langle I_{RIN}^2 \rangle$ , noise thermal  $\langle I_{th}^2 \rangle$ , gain amplifier optik  $G_{op}$ , indeks modulasi optik  $m$ , arus DC rata-rata yang terdeteksi  $I_D$ , dan rugi-rugi propagasi  $L_{wl}$
2. Hitung rugi-rugi dalam saluran optik  $L_{op}$
3. Hitung total noise dalam saluran optik  $n_{op}^2(t)$
4. Hitung SNR sistem melalui persamaan

$$\frac{m^2 I_D^2 P_{RF,in} 10^{(-L_{op}/10)}}{[n_{op}^2(t)] + \left( 10^{(n_{el}^2(t))/10} \times \left( \frac{10^{(L_{el})/10}}{10^{(G_{op})/10}} \right)^2 \right)} \quad (1)$$

**Algoritma 2. Perhitungan Kapasitas Kanal Sistem**

1. Mulai dengan memasukkan nilai bandwidth sistem  $B_{sistem}$  dan SNR<sub>sistem</sub> dari perhitungan sebelumnya
2. Hitung kapasitas kanal sistem melalui persamaan

$$C = B_{sistem} \log_2(1 + SNR_{sistem}) \quad (2)$$

**Algoritma 3. Perhitungan Bit Rate Sistem**

1. Mulai dengan memasukkan nilai rise time sumber  $\Delta\tau_{sumber}$  dan penerima  $\Delta\tau_{penerima}$ , panjang serat optik  $L$ , lebar spektrum sumber optik  $\Delta\lambda$ , dan koefisien dispersi material  $D_m$
2. Hitung nilai dispersi material sistem melalui

$$\Delta\tau_{mat} = D_m \times \Delta\lambda \times L \quad (3)$$

3. Hitung nilai dispersi sistem melalui

$$\Delta\tau_{sistem} = \sqrt{\Delta\tau_{sumber}^2 + \Delta\tau_{receiver}^2 + \Delta\tau_{mat}^2} \quad (4)$$

4. Hitung bit rate sistem, di sini yang digunakan adalah format pengkodean NRZ

$$BR_{NRZ} = \frac{0.7}{\Delta\tau_{sistem}} \quad (5)$$

**Algoritma 4. Perhitungan BER Sistem**

1. Mulai dengan memasukkan nilai SNR sistem dari algoritma pertama
2. Hitung nilai BER sistem melalui

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{SNR_{sistem}}) \quad (6)$$

Kelebihan dari sistem transmisi *multicarrier* OFDMA adalah dapat mengefisienkan penggunaan *bandwidth*[14]. Selain itu sistem OFDMA dapat menjaga setiap *subcarrier* yang satu dengan yang lain agar tetap *orthogonal* dan mencegah terjadinya interferensi (ISI dan ICI) pada sistem, dengan menggunakan *cyclic prefix* (CP). *Cyclic prefix* (CP) merupakan duplikat bagian akhir dari simbol OFDMA untuk menghilangkan *delay spread* yang

terjadi antar data yang saling tumpang tindih. Berdasarkan aturan yang telah ditetapkan bahwa *delay spread* tidak boleh melebihi 10% dari panjang simbol OFDMA agar nilai BER tetap kecil yaitu bernilai  $10^{-3}$  bahkan kurang. Dengan demikian interval CP harus lebih besar atau sama dengan *delay spread* maksimum ( $T_{cp} \geq 2\tau$ ) agar orthogonalitas antar *subcarrier* tetap terjaga. Pada model OFDMA untuk standar IEEE 802.16, dinyatakan bahwa panjang simbol 102.9  $\mu s$  dengan durasi simbol 91.4  $\mu s$ , sehingga panjang CP yang digunakan untuk analisis adalah:

$$\begin{aligned} \alpha_{cp} &= T_{cp}/T_b = (T_s - T_b)/T_b \\ &= (102.9 - 91.4)/91.4 = 1/8 \\ &= 12.5\% \end{aligned}$$

CP yang digunakan adalah 1/8 (12.5%) dari durasi simbol OFDMA untuk menoleransi *delay spread* mencapai 11.4  $\mu s$ , berdasarkan model OFDMA pada standar IEEE 802.16 [15].

*Signal to noise ratio* dihitung di sisi *receiver* (*user*) dengan pemodelan sistem berdasarkan propagasinya. SNR merupakan perbandingan antara daya sinyal yang diterima di sisi *user* dengan *noise* total yang dialami oleh sinyal. Sinyal  $r(t)$  terdiri dari dua komponen, yaitu sinyal  $s(t)$  dan *noise* total  $n(t)$ .

$$r(t) = D \cdot s(t) + n(t) \quad (7)$$

[16] menyatakan bahwa:

$$D = m I_D 10^{-L_{op}/10} \frac{G_{op}}{L_{wl}} \quad (8)$$

$$n(t) = \frac{n_{op}(t) G_{op}}{L_{wl}} + n_{wl}(t) \quad (9)$$

dengan:

$m$  = indeks modulasi optik

$I_D$  = arus yang terdeteksi oleh detector

$G_{op}$  = gain optik pada *radio access point*

$L_{el}$  = rugi-rugi *pathloss*

$n_{op}$  = *noise* saluran optik, yang terdiri dari *thermal noise*, *shot noise*, serta *RIN*

$n_{wl}$  = *noise wireless* (AWGN)

Sehingga daya sinyal  $r(t)$  juga terdiri dari daya sinyal dan daya *noise*, yaitu

$$E[r^2(t)] = E[r_s^2(t)] + E[r_n^2(t)] \quad (10)$$

Dari substitusi antara persamaan (7) dengan persamaan (8) didapatkan:

$$E[r_s^2(t)] = m^2 I_D^2 10^{-L_{op}/10} \left(\frac{G_{op}}{L_{el}}\right)^2 E[s^2(t)] \quad (11)$$

$$E[r_n^2(t)] = \left(\frac{G_{op}}{L_{el}}\right)^2 E[n_{op}^2(t)] + E[n_{wl}^2(t)] \quad (12)$$

Jika SNR didefinisikan sebagai perbandingan antara daya sinyal yang diterima dengan daya *noise* yang dialami sesuai persamaan (13)

$$SNR = \frac{E[r_s^2(t)]}{E[r_n^2(t)]} \quad (13)$$

Sehingga didapatkan nilai SNR sesuai dengan persamaan (1).

Tabel 1 Spesifikasi Mobile WiMax 802.16e [17]

Parameter	Value
Frekuensi Operasi	2300 MHz
Duplex	TDD
Bandwidth kanal	5 MHz
Teknik modulasi	QPSK, 16-QAM, 64-QAM
Radius Cell	2 -5 kilometers
Tinggi <i>Base station</i>	32 meters
Tinggi <i>Mobile Terminal</i>	1,5 meters
BS Maximum Power	35 dBm
BS Antenna Gain	16 dBi
MS Antenna Gain	0 dBi
Mobile Terminal Maximum PA power	23 dBm
Operating Temperature	0°C - 40°C

Selain spesifikasi *mobile* WiMAX, digunakan juga spesifikasi teknologi *radio over fiber* pada Tabel 2.

Tabel 2 Spesifikasi Teknologi *Radio over Fiber*[18]

Parameter	Nilai
Suhu Referensi (T)	300 K
Rise time transmitter ( $\Delta\tau_{source}$ )	16 psec
Rise time receiver ( $\Delta\tau_{receiver}$ )	24 psec
RIN (Relative Intensity Noise)	-155 dB/Hz
Panjang gelombang ( $\lambda$ )	$1 \text{ mm} \leq \lambda \leq 1.5 \text{ mm}$
Daya optik rata-rata ( $P_0$ )	$0.2 \text{ W} \leq P_0 \leq 0.597 \text{ W}$
Indeks modulasi optik (m)	$0.1 \leq m \leq 0.9$
Gain modulasi laser ( $G_m$ )	0.12 mW/mA
Responsivitas detektor ( $\rho$ )	0.75 mA/mW

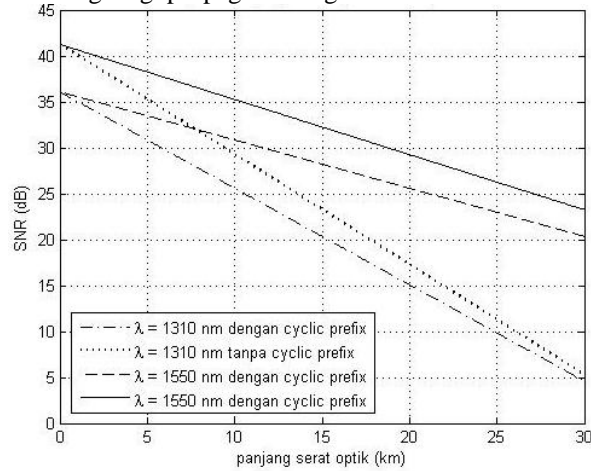
## HASIL DAN PEMBAHASAN

Kinerja OFDMA pada teknologi *radio over fiber* yang dibahas dalam penelitian ini memiliki variabel bebas panjang serat optik, *bandwidth* sistem, serta panjang gelombang yang digunakan. Performansi yang diamati meliputi *signal-to-noise ratio* (SNR), kapasitas kanal, *bit rate*, dan *bit error rate* (BER) teknologi RoF yang menggunakan teknik *multiple access* OFDMA.

Parameter yang digunakan untuk menganalisis kinerja teknologi *radio over fiber* yang menggunakan sistem *mobile* WiMAX dengan penerapan OFDMA adalah menggunakan standar IEEE 802.16e. Hasil simulasi, analisis dan pembahasan diuraikan sebagai berikut:

### Analisa SNR Sistem

Kanal noise yang digunakan dalam menghitung SNR terdiri dari kanal optik dan kanal *wireless*. Kanal *wireless* terdiri dari noise AWGN serta rugi-rugi propagasi ruang bebas.



Gambar 2. Pengaruh panjang serat optik terhadap SNR Sistem

Gambar 2 memperlihatkan bahwa untuk transmisi dengan panjang gelombang yang sama, nilai SNR<sub>sistem</sub> OFDMA dengan *cyclic prefix* lebih kecil jika dibandingkan dengan SNR<sub>sistem</sub> OFDMA tanpa *cyclic prefix*. Pemisahan *cyclic prefix* pada penerima menyebabkan rugi-rugi energi yang berdampak pada penurunan SNR.

Semakin panjang serat optik yang digunakan, nilai SNR<sub>sistem</sub> akan semakin kecil, karena *losses* yang terjadi dalam proses transmisi semakin besar. Panjang serat optik berbanding lurus dengan nilai *losses* optik.

Pada panjang serat optik yang sama, nilai SNR<sub>sistem</sub> untuk panjang gelombang 1310 nm lebih kecil jika dibandingkan dengan panjang gelombang 1550 nm. Karena nilai  $L_{op}$  yang dihasilkan panjang gelombang 1310 nm lebih kecil jika dibandingkan dengan  $L_{op}$  untuk panjang gelombang 1550 nm. Hal ini sesuai dengan persamaan matematis rugi-rugi optik  $L_{op}$  di mana nilai koefisien redaman untuk panjang gelombang 1550 nm lebih kecil jika dibandingkan dengan koefisien redaman untuk panjang gelombang 1310 nm.

### Analisa Kapasitas Kanal Sistem

Perhitungan analisis kapasitas kanal sistem menggunakan teorema Shannon. Untuk memperoleh kapasitas kanal sistem maka dibutuhkan parameter SNR<sub>sistem</sub> serta *bandwidth* sinyal pada saluran optik. Nilai *bandwidth* sinyal dalam saluran optik, untuk panjang serat optik 10 km dan panjang gelombang 1310 nm ditentukan dengan:

$$\Delta\tau_{mat} = D_m \times \Delta\lambda \times L \quad (14)$$

$$\Delta\tau_{mat} = 14 \times 0.1 \times 10 = 14$$

$$\Delta\tau_{sistem} = \sqrt{(\Delta\tau_{sumber})^2 + (\Delta\tau_{receiver})^2 + (\Delta\tau_{mat})^2}$$

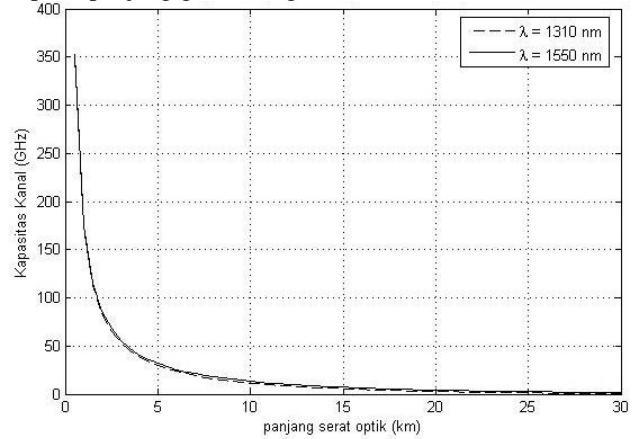
$$\Delta\tau_{sistem} = \sqrt{(16)^2 + (25)^2 + (14)^2}$$

$$= 32.82 \text{ psec}$$

$$BW_{sig} = \frac{0.44}{\Delta\tau_{sistem} \times L}$$

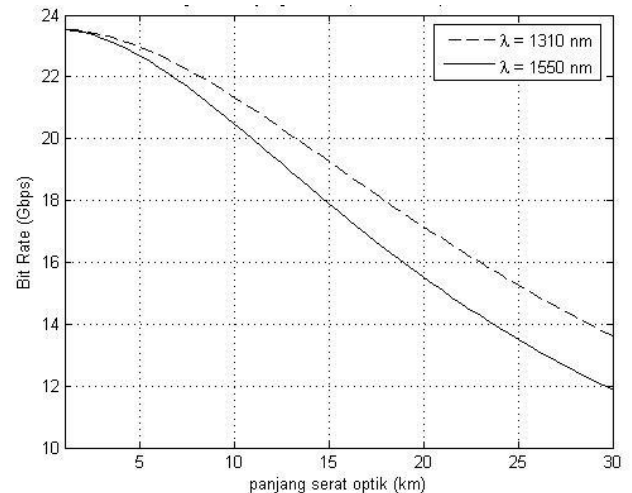
$$BW_{sig} = \frac{0.44}{32.82 \times 10} = 1.34 \text{ GHz}$$

Gambar 3 menunjukkan bahwa nilai kapasitas kanal berubah secara logaritmik terhadap perubahan panjang serat optik yang digunakan karena SNR<sub>sistem</sub> berubah secara logaritmik terhadap panjang serat optik. Semakin besar panjang kanal sistem semakin kecil, karena nilai SNR<sub>sistem</sub> serta *bandwidth* untuk serat optik yang lebih panjang juga semakin kecil. Sedangkan untuk panjang serat optik yang sama, panjang gelombang 1310 nm memiliki kapasitas kanal yang lebih besar dibandingkan dengan panjang gelombang 1550 nm, perbedaan nilai ini disebabkan perbedaan nilai SNR<sub>sistem</sub> dan *bandwidth*. Untuk panjang gelombang 1310 nm, SNR<sub>sistem</sub> lebih kecil, akibat dari koefisien redaman optik yang lebih besar, tetapi *bandwidth* sistem lebih besar karena koefisien dispersi panjang gelombang 1310 nm lebih kecil.



Gambar 3. Pengaruh panjang serat optik terhadap kapasitas kanal

### Analisa Bit Rate Sistem



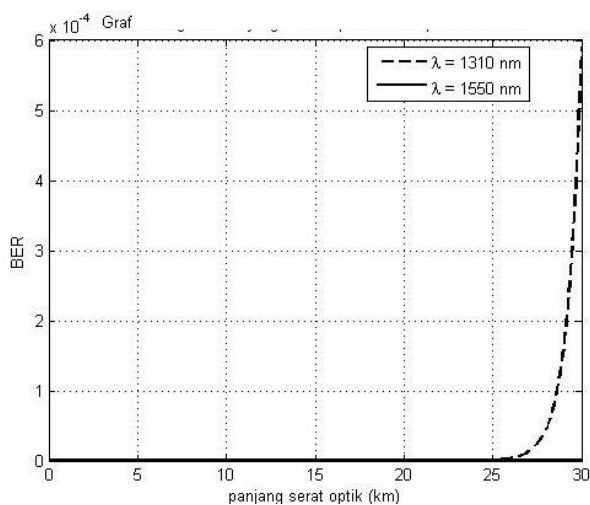
Gambar 4. Pengaruh panjang serat optik terhadap bit rate sistem

Gambar 4 menunjukkan hubungan antara panjang serat optik yang digunakan dengan *bit rate* dalam kanal optik. Panjang serat optik berbanding terbalik

dengan *bit rate* sistem dalam kanal optik, semakin besar panjang serat optik yang digunakan, semakin kecil *bit rate* sistem dalam saluran optik. Kondisi ini dikarenakan semakin besar panjang serat optik yang digunakan, nilai dispersi material sistem semakin besar, sehingga *bit rate* semakin kecil. Sedangkan untuk nilai panjang serat optik yang sama, panjang gelombang 1310 nm memiliki *bit rate* yang lebih tinggi daripada panjang gelombang 1550 nm, hal ini disebabkan panjang gelombang 1310 nm memiliki nilai koefisien dispersi yang lebih kecil dibandingkan dengan koefisien dispersi pada panjang gelombang 1550 nm.

### Analisa BER Sistem

*Bit Error Rate* (BER) merupakan perbandingan nilai bit yang salah saat proses transmisi, dihitung di sisi *receiver*. Hubungan panjang serat optik terhadap BER sistem ditampilkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Pengaruh panjang serat optik terhadap BER

Pada Gambar 9 dapat dilihat bahwa semakin besar panjang serat optik yang digunakan, semakin besar BER yang dihasilkan, dengan kata lain nilai BER berbanding lurus dengan panjang serat optik.

Untuk panjang serat optik yang sama, nilai BER panjang gelombang 1550 nm jauh lebih kecil jika dibandingkan dengan BER untuk panjang gelombang 1310 nm. Hal ini karena nilai SNR sistem panjang gelombang 1550 nm lebih tinggi.

Nilai BER yang diharapkan adalah nilai BER yang kecil, karena nilai BER yang kecil berarti hanya sedikit kesalahan yang terjadi dalam transmisi, dengan kata lain data yang diterima semakin menyerupai data yang dikirimkan.

### KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dan simulasi perhitungan, dapat disimpulkan bahwa seiring dengan meningkatnya panjang serat optik yang digunakan, nilai SNR<sub>sistem</sub>, kapasitas kanal, dan *bit rate* akan menurun seiring dengan panjang serat optik yang digunakan. Sebaliknya, nilai BER akan meningkat

seiring dengan semakin besarnya panjang serat optik. SNR<sub>sistem</sub> dan kapasitas kanal untuk panjang gelombang 1550 nm lebih tinggi dibandingkan SNR untuk panjang gelombang 1310 nm. Di sisi lain, panjang gelombang 1310 nm memiliki nilai *bit rate* dan BER yang lebih tinggi dibandingkan panjang gelombang 1550 nm. Panjang gelombang 1550 nm lebih cocok untuk implementasi RoF dengan jarak jangkauan yang lebih rendah dan kapasitas yang lebih tinggi dibandingkan 1310 nm.

### DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. S. Chahine, U. A. K. Okonkwo, and R. Ngah, "Study the Performance of OFDM Radio over Fiber for Wireless Communication Systems," in *2008 IEEE International RF and Microwave*, 2008, pp. 335–338.
- [2] A. M. Zin, M. S. Bongsu, S. M. Idrus, and N. Zulkifli, "An overview of radio-over-fiber network technology," *2010 Int. Conf. Photonics, ICP2010*, pp. 0–2, 2010.
- [3] Pooja, Saroj, and Manisha, "Advantages and Limitation of Radio over Fiber System," *Int. J. Comput. Sci. Mob. Comput.*, vol. 45, no. 5, pp. 506–511, 2015.
- [4] J. Guillory, "Radio over Fiber for the Future Home Area Networks," University of Paris-Est, 2012.
- [5] A. Dixit, "Architectures and algorithms for radio-over-fiber networks," *J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 10, no. 5, pp. 535–544, 2018.
- [6] Febrizal, "Evaluasi Kinerja Sistem OFDM Radio over Fiber (OFDM-RoF)," *J. Sains dan Teknol.*, vol. 8, no. 1, pp. 13–17, 2009.
- [7] S. Zhou *et al.*, "Performance of optical OFDM transmission over RoF system with Mach-Zehnder modulator," in *Proc. of SPIE-OSA-IEEE Asia Communications and Photonics*, 2011, vol. 8309, no. 1, p. 83092D.
- [8] J. D. Cepeda, S. I. Rodr, C. D. Mu, and M. Var, "Performance Evaluation of a real time OFDM Radio Over Fiber System at 2.5 GHz using Software Defined Radio SDR," in *2017 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, 2017.
- [9] B. Ftaich-Frigui, C. Aupetit-Berthelemot, M. Mouhamadou, C. Kazmierski, C. Decroze, and D. Carsenat, "OFDM-WiMAX modulation of a reflective amplified modulator in radio-over-fiber context," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 23, no. 16, pp. 1109–1111, 2011.
- [10] S. Mikroulis, M. P. Thakur, and J. E. Mitchell, "Comparison of OFDM standards for 60GHz SMF-MMF radio over fiber links," *IEEE Int. Conf. Commun.*, vol. 2015-Sept, pp. 1376–1379, 2015.

- [11] C. C. Wei, C. T. Lin, M. I. Chao, and W. J. Jiang, "Adaptively modulated OFDM RoF signals at 60 GHz over long-reach 100-km transmission systems employing phase noise suppression," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 24, no. 1, pp. 49–51, 2012.
- [12] Y. M. Lin and P. L. Tien, "Next-generation OFDMA-based passive optical network architecture supporting radio-over-fiber," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 28, no. 6, pp. 791–799, 2010.
- [13] J. Zhang and N. Ansari, "On OFDMA resource allocation and wavelength assignment in OFDMA-Based WDM radio-over-fiber picocellular networks," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 29, no. 6, pp. 1273–1283, 2011.
- [14] P. K. Gkonis, M. A. Seimeni, N. P. Asimakis, D. I. Kaklamani, and I. S. Venieris, "A new subcarrier allocation strategy for MIMO-OFDMA multicellular networks based on cooperative interference mitigation," *Sci. World J.*, vol. 2014, 2014.
- [15] F. Wang *et al.*, "Mobile WiMAX Systems : Performance and Evolution," *IEEE Commun. Mag.*, no. October, pp. 41–49, 2008.
- [16] X. Fernando, "Radio over fiber in multimedia access networks," in *Proceedings of the 1st International Conference on Access Networks AccessNets '06*, 2006, vol. 267.
- [17] W. ForumTM, "Mobile WiMAX–Part 1: A Technical Overview and Performance Evaluation," *White Pap. June*, vol. 2.8, p. 15, 2006.
- [18] A. E.-N. A. Mohamed, M. M. E. El-halawany, A. N. Z. Rashed, and M. S. F. Tabbour, "High Transmission Performance of Radio over Fiber Systems over Traditional Optical Fiber Communication Systems using Different Coding Formats for Long Haul Applications," *Int. J. Adv. Eng. Technol.*, vol. 1, no. 3, pp. 180–196, 2011.