

PERFORMANSI *DIGITIZED RADIO-OVER-FIBER (D-RoF)* PADA JARINGAN 40G WDM-PON SISI *DOWNSTREAM*

Performance of Digitized Radio-over-Fiber Over 40G WDM-PON Network at Downstream Link

Zulfikar Sandy Pratama¹, Akhmad Hambali², Brian Pamukti³

^{1,2,3} Prodi S1 Teknik Telekomunikasi, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom
Jalan Telekomunikasi No.1 Terusan Buah Batu Bandung 40257 Indonesia

¹zulfikarsandy@students.telkomuniversity.ac.id, ²ahambali@telkomuniversity.ac.id,
³brianp@telkomuniversity.ac.id

ABSTRAK

Pada Radio-over-Fiber (RoF) yang mentransmisikan sinyal radio analog masih terdapat beberapa masalah diantaranya distorsi inter-modulasi (IMD) yang disebabkan oleh factor nonlinearitas dari gelombang mikro dan komponen optik. *Bit rate* yang tinggi menyebabkan informasi yang ditransmisikan rentan terhadap *inter-symbol interference* (ISI) dan dispersi pada serat optik. Solusi untuk mengatasi masalah tersebut yaitu dengan mengkonversi sinyal analog menjadi sinyal digital, atau yang disebut digitalisasi, dan mengkompensasi dispersi dengan *Dispersion Compensating Fiber* (DCF). Pada penelitian ini, dilakukan analisis terhadap performansi *Digitized Radio-over-Fiber* berdasarkan BER, *Q-Factor*, dan daya yang disimulasikan dengan program simulasi *Optisystem* lalu dibandingkan dengan *Analog Radio-over-Fiber* yang kedua sistem tersebut diintegrasikan dengan jaringan WDM-PON dengan *bit rate* akumulasi 40 Gbps. Hasil simulasi menunjukkan *Analog RoF* mempunyai *Q-Factor* 16,26; 14,03; 8,92 dan *Digitized RoF* mempunyai *Q-Factor* 22,15; 17,84; 10,52; pada jarak transmisi 40 km, 60 km, dan 80 km.

Kata kunci : *Radio-over-Fiber, Analog, Digitized, WDM-PON, 40G*

ABSTRACT

Radio-over-Fiber technology that transmitted analog radio signal still experienced some problems including inter-modulation distortion (IMD) caused by nonlinearity factor from microwave and optical component. High bit rate transmission caused the transmitted information to be susceptible to inter-symbol interference (ISI) and dispersion in optical fiber. Solutions to these problems are converting the analog radio signal to become digitized, and using a Dispersion Compensating Fiber (DCF). In this research we have done some analysis about Digitized Radio-over-Fiber performance based on its BER, Q-Factor, and power. The result will be compared to Analog Radio-over-Fiber system. Both systems have 40 Gbps bit rate accumulation and is integrated with WDM-PON network. From the simulation we get the results for Analog RoF with Q-Factor 16,2676; 14,0293; 8,9212 and Digitized RoF with Q-Factor 22,15; 17,84; 10,52; for the transmission distance of 40 km, 60 km, and 80 km..

Keywords: *Radio-over-Fiber, Analog, Digitized, WDM-PON, 40G*

1. Pendahuluan

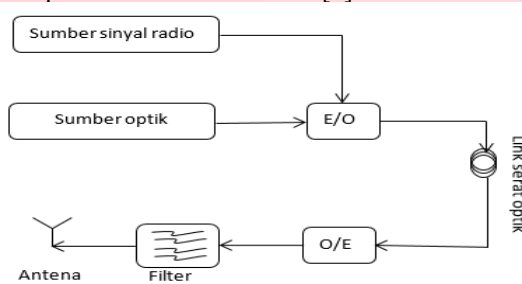
Permintaan akan layanan *broadband* yang memerlukan kecepatan data yang tinggi dan *bandwidth* yang besar semakin meningkat dalam beberapa tahun terakhir. Dalam memenuhi hal tersebut, diperlukan sebuah jaringan akses yang dapat mendukung permintaan yang bertambah. Teknologi *Radio-over-Fiber* (RoF), integrasi antara jaringan gelombang mikro dan jaringan optik, merupakan salah satu solusi yang berpotensi untuk meningkatkan kapasitas dan mobilitas maupun mengurangi biaya (*cost*) pada jaringan akses [4]. Pada dasarnya, RoF berarti mentransmisikan informasi melalui serat optik dengan memodulasi cahaya dan sinyal radio, dimana sinyal radio sendiri merupakan salah satu macam sinyal analog. Karena karakteristik dari sinyal analog, masih ada kekurangan dalam penerapan RoF, diantaranya kerentanan terhadap nonlinearitas dari komponen *microwave* dan optik, degradasi sinyal pada link serat optik yang jauh, dan latensi karena propagasi serat optik [5][6][9]. Dari masalah-masalah tersebut, dikembangkan teknologi *Digitized Radio-over-Fiber* (*Digitized RoF*). *Digitized RoF* memanfaatkan pengubahan sinyal analog menjadi sinyal digital, secara teori dapat membebaskan terhadap masalah yang dihadapi pada sinyal analog. Selain itu, *Digitized RoF* juga memudahkan integrasi dengan jaringan

broadband saat ini dan masa mendatang dikarenakan performansi yang tinggi dan biaya yang lebih efektif dari *Base Station* (BS) yang lebih sederhana. *Link* optik yang membawa sinyal informasi digital dapat menjaga kualitas sinyal informasi tersebut meskipun jarak transmisinya jauh [6].

2. Dasar Teori

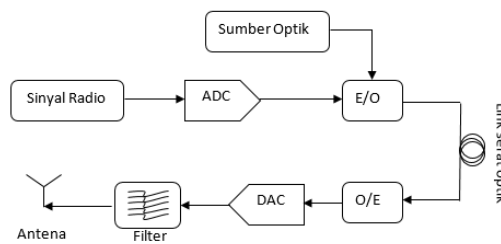
A. Radio over Fiber (RoF)

RoF merupakan transmisi pada jaringan serat optik yang membawa sinyal radio. Sinyal tersebut membawa informasi penting untuk layanan komunikasi radio dan *payload*. Sinyal yang ditransmisikan dapat berbentuk sinyal RF (*Radio Frequency*), sinyal IF (*Intermediate Frequency*), dan sinyal baseband berdasarkan ITU-T G.Sup55. Sinyal radio tersebut dimodulasikan dengan cahaya dengan menggunakan teknik *Intensity Modulation and Direct Detection* (IM/DD) ataupun *External Modulation* [1].



Gambar 1 Arsitektur dasar RoF

Gambar 1 menjelaskan tentang arsitektur dasar RoF, dimana sinyal radio dimodulasikan dengan sinyal pembawa berbentuk sinyal optik dan ditransmisikan melalui *link* serat optik. Terdapat beberapa macam sistem RoF, diantaranya Analog RoF dan *Digitized* RoF. Analog RoF merupakan transmisi sinyal radio yang berbentuk analog pada jaringan serat optik. Sementara **Digitized** RoF merupakan transmisi sinyal radio berbentuk analog yang dikonversi menjadi sinyal digital pada saat melalui link serat optik [7].

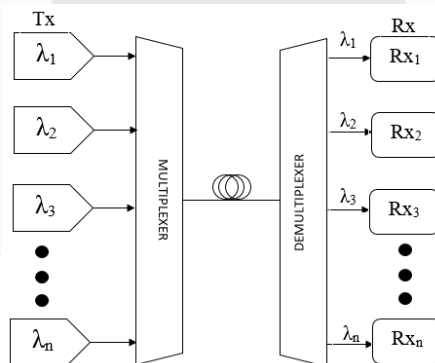


Gambar 2 Arsitektur dasar Digitized RoF

Gambar 2 menggambarkan tentang arsitektur dasar *Digitized* RoF, dimana sinyal radio dikonversi menjadi bentuk sinyal digital sebelum ditransmisikan pada *link* serat optik [7][8]. Analog RoF mengirimkan sinyal radio yang berbentuk analog, *Digitized* RoF memproses sinyal radio termodulasi hingga terdigitalisasi.

B. Wavelength Division Multiplexing (WDM)

WDM merupakan salah satu teknologi pada komunikasi serat optik yang membawa beberapa panjang gelombang yang berbeda untuk digabung dan disalurkan dalam satu channel serat optik pada sinyal *downstream* dan *upstream* [2][3]. Jumlah panjang gelombang yang dapat ditransmisikan bersamaan dalam WDM beragam, dari 2 panjang gelombang berbeda hingga ratusan panjang gelombang yang berbeda.



Gambar 3 Wavelength Division Multiplexing (WDM)

Beberapa panjang gelombang di setiap kanal digabungkan menjadi satu untuk ditransmisikan pada serat optik seperti pada Gambar 3. WDM digunakan untuk mengoptimalkan manfaat dari bandwidth yang disediakan pada serat optik, meningkatkan kapasitas *link*, serta mendapatkan *bit rate* yang tinggi dalam transmisi serat optik. Sebagai contoh, jika satu kanal WDM 8 kanal mempunyai laju bit 5 Gbps, maka dalam kabel serat optik laju bit akumulasi yang digunakan yaitu 40 Gbps. Berdasarkan jarak spasi antar panjang gelombang, teknologi WDM dibagi menjadi 2 yaitu *Dense Wavelength Division Multiplexing* (DWDM) dan *Coarse Wavelength Division Multiplexing* (CWDM). DWDM mempunyai spasi kanal 200 GHz, 100 GHz, 50 GHz, 25 GHz, bahkan 12,5 GHz. DWDM bekerja menggunakan panjang gelombang 1470 nm hingga 1610 nm. Sementara CWDM menggunakan spasi kanal 20 nm dan bekerja pada panjang gelombang 1271-1611 nm.

C. Passive Optical Network (PON)

PON merupakan jaringan akses serat optik yang terdiri dari perangkat optik pasif dalam jaringan distribusi optik. Perangkat optik pasif yang dipakai yaitu konektor, *passive splitter* dan kabel serat optik itu sendiri. Adanya *splitter* dapat membagi transmisi pada jaringan serat optik menjadi beberapa kabel optik lagi dengan kualitas informasi yang sama. Dalam PON, terdapat beberapa komponen utama diantaranya *Optical Line Terminal* (OLT), *Optical Distribution Network* (ODN), dan *Optical Network Unit* (ONU) atau *Optical Network Terminal* (ONT). OLT merupakan perangkat optik yang terletak pada *Central Office* (CO). ODN merupakan penghubung antara OLT dan ONU. ONU merupakan perangkat pada sisi pelanggan.

D. Dispersion Compensating Fiber (DCF)

Pada sistem jaringan serat optik, terdapat beberapa masalah dalam pentransmian data yang disebabkan oleh karakteristik serat optik yang digunakan, salah satunya yaitu dispersi kromatik. Dispersi kromatik merupakan fenomena dimana beberapa komponen spektrum seperti panjang gelombang pada suatu pulsa berjalan dengan kecepatan yang berbeda. Dispersi kromatik menyebabkan informasi yang ditransmisikan pada serat optik melebar sehingga sulit untuk membedakan informasi tersebut. Jika informasi berbentuk bit 0 dan bit 1, efek dari dispersi kromatik membuat bit 0 dan bit 1 sulit dibedakan pada *photodetector* karena mengalami degradasi saat ditransmisikan. Penentuan panjang serat optik SMF dan DCF harus memenuhi persamaan berikut :

$$D_{SMF} \cdot L_{SMF} + D_{DCF} \cdot L_{DCF} = 0$$

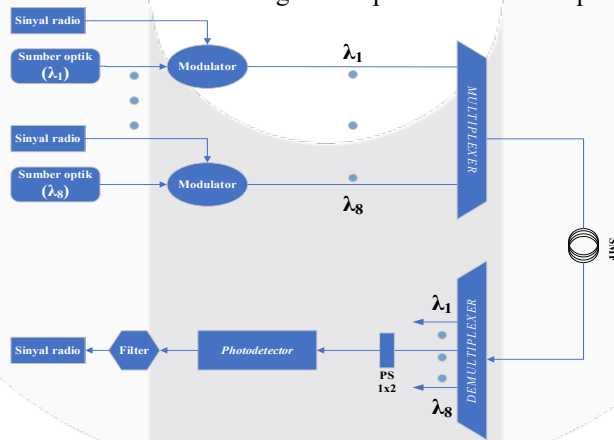
$$D_{SMF} \cdot L_{SMF} = -D_{DCF} \cdot L_{DCF} \dots \dots \dots (1)$$

Dari Persamaan (1), *D* merupakan dispersi kromatik serat optik, dan *L* merupakan panjang serat optik. Sistem yang menggunakan DCF berarti dispersi pada sistem terkompensasi (*D=0*) [10]. Efek dari dispersi kromatik biasanya terlihat pada sistem dengan *bit rate* yang tinggi, salah satunya penurunan kualitas sinyal yang ditransmisikan.

3. Pembahasan

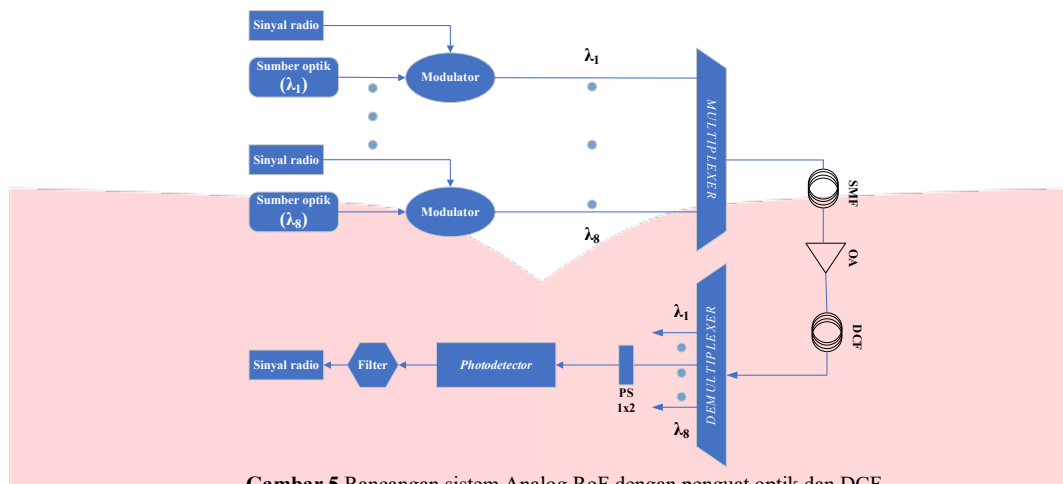
A. Model Sistem Analog RoF 40G WDM-PON

Rancangan sistem dapat dilihat pada Gambar 4 untuk sistem tanpa penguat optik dan DCF dan Gambar 5 untuk sistem dengan penguat optik dan DCF. Sistem ini digunakan pada skenario satu penelitian.



Gambar 4 Rancangan sistem Analog RoF tanpa penguat optik dan DCF

Gambar 4 memperlihatkan simulasi pertama yang akan dilakukan pada skenario satu belum dilakukan penambahan penguat optik dan DCF. Terdapat 8 kanal transmisi pada sistem. Dimulai dari frekuensi sinyal optik pada kanal 1 yaitu 192,9 THz, hingga pada kanal 8 yaitu 192,9 THz. Jarak spasi tiap kanal sebesar 100 GHz.

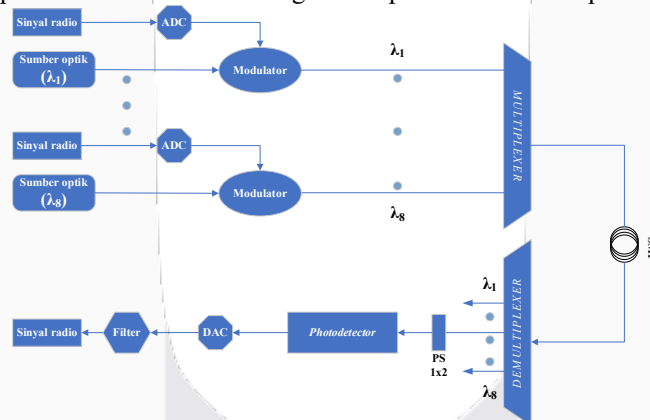


Gambar 5 Rancangan sistem Analog RoF dengan penguat optik dan DCF

Gambar 5 memperlihatkan simulasi kedua yang akan dilakukan pada skenario satu dilakukan penambahan penguat optik dan DCF. Sistem *Analog RoF* menggunakan konfigurasi umum DWDM yang terdiri dari *transmitter*, mux/demux, *link* serat optik, dan *receiver*. Jumlah kanal yang digunakan sebanyak 8 kanal masing-masing mentransmisikan sinyal informasi dengan *bit rate* 5 Gbps. Nilai akumulasi *bit rate* dalam transmisi pada serat optik yaitu 40 Gbps. Kemudian sinyal informasi melalui *multiplexer* dan diteruskan menuju *link* serat optik. Kabel serat optik yang digunakan yaitu *Single-mode Fiber* (SMF). Pada sisi *receiver*, 1 kanal transmisi masing-masing dibagi menjadi 2 jalur distribusi ke *end-user*, yang berarti pada akhir transmisi terdapat 16 *end-user*. Untuk mengatasi dispersi dan pelemahan daya saat transmisi sinyal, dilakukan penambahan *Dispersion Compensating Fiber* (DCF) dan penguat optik. Parameter yang diubah yaitu jarak total *link* serat optik dimulai dari 40 km sampai 120 km.

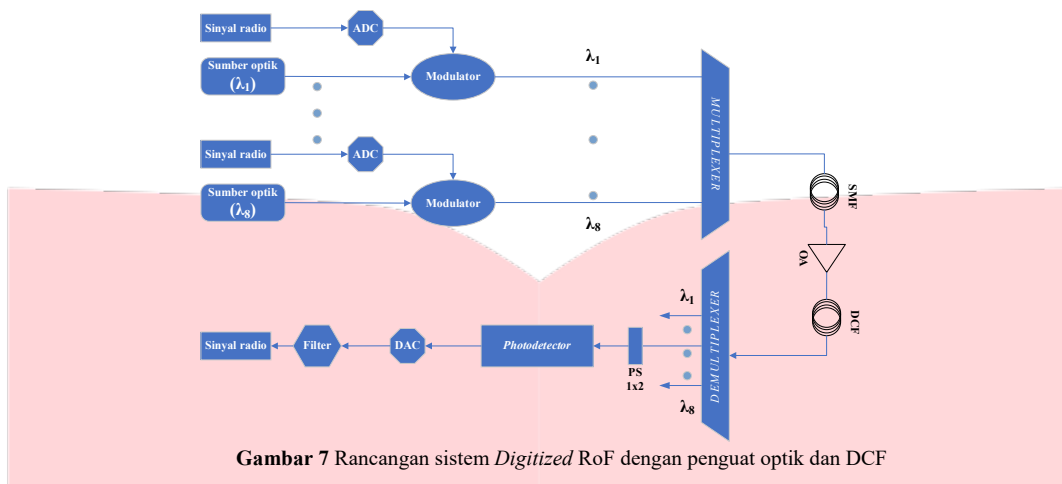
B. Model Sistem Digitized RoF 40G WDM-PON

Rancangan sistem dapat dilihat pada Gambar 6 untuk sistem tanpa penguat optik dan DCF dan Gambar 7 untuk sistem dengan penguat optik dan DCF. Sistem ini digunakan pada skenario dua penelitian.



Gambar 6 Rancangan sistem Digitized RoF tanpa penguat optik dan DCF

Gambar 6 memperlihatkan simulasi pertama yang akan dilakukan pada skenario dua belum dilakukan penambahan penguat optik dan DCF. Terdapat tambahan perangkat pengkonversi sinyal analog menjadi digital, yaitu *Analog to Digital Converter* (ADC) dan *Digital to Analog Converter* (DAC). ADC disusun sebelum sinyal radio melalui modulator, sedangkan DAC setelah sinyal optik melalui *photodetector*.



Gambar 7 Rancangan sistem Digitized RoF dengan penguat optik dan DCF

Gambar 7 memperlihatkan simulasi kedua yang akan dilakukan pada skenario dua dilakukan penambahan penguat optik dan DCF. Sinyal informasi *analog* sebelum ditransmisikan melalui serat optik, terlebih dahulu dikonversi menjadi sinyal *digital* melalui ADC. Setelah dikonversi menjadi sinyal digital, sinyal radio ditumpangkan pada cahaya dari sumber optik yang lalu ditransmisikan melalui *multiplexer* dan *link* serat optik. Pada saat diterima oleh *receiver*, sinyal transmisi *digital* dikonversi kembali menjadi sinyal *analog* seperti semula melalui DAC lalu didemodulasi dan dilewatkan pada LPF yang berada pada *demodulator* untuk mendapatkan sinyal radio awal transmisi.

C. Penentuan Spesifikasi Perangkat

Penentuan spesifikasi perangkat berdasarkan standar ITU-T dan perangkat yang sudah dikomersilkan oleh beberapa *vendor*. Pada Tabel 1 dapat dilihat beberapa parameter yang digunakan pada simulasi yang diambil dari *datasheet* perangkat yang digunakan.

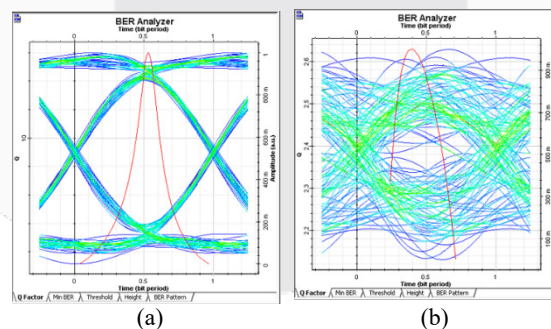
Tabel 1 Spesifikasi *transmitter*

Parameter	Nilai	Satuan
Frekuensi sinyal radio	5	GHz
<i>Bit rate</i>	40	Gbps
Daya (per sumber optik)	1	mW
Jumlah kanal	8	kanal
Spasi kanal	100	GHz
Frekuensi sinyal optik	192,2, 192,3, 192,4, 192,5, 192,6, 192,7, 192,8, 192,9	THz
Atenuasi (SMF; DCF)	0.2 ; 0,5	dB/km
Dispersi (SMF; DCF)	17 ; -85	ps/nm-km

4. Analisis Hasil Simulasi Sistem

A. Sistem Analog RoF 40G WDM-PON

Pada skenario pertama dilakukan simulasi sistem *Analog* RoF WDM-PON dengan dua kali simulasi. Simulasi pertama dilakukan tanpa menambahkan penguat optik dan DCF, dan simulasi kedua dilakukan dengan menambahkan penguat optik dan DCF pada sistem.



Gambar 8 Bentuk *eye diagram*, nilai BER dan Q-Factor sistem *Analog* RoF WDM-PON pada jarak 40 km (a) tanpa dan (b) dengan penambahan penguat optik dan DCF

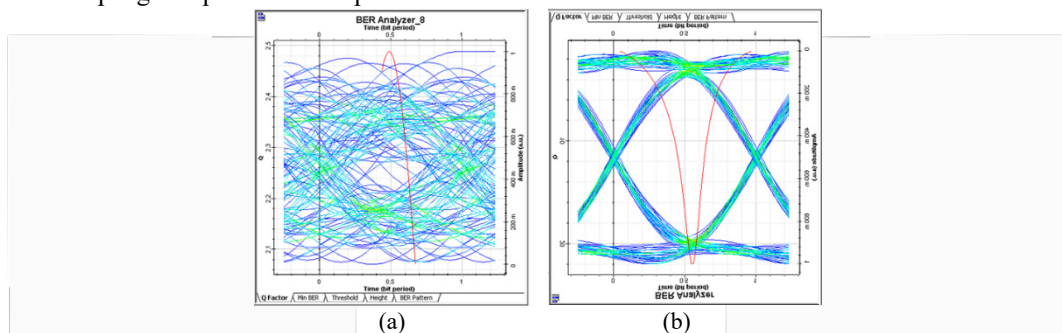
Pada Gambar 8 diberikan hasil *eye diagram* dari salah satu kanal dari pengujian skenario satu pada jarak 40 km, dengan bagian (a) sistem yang belum terdapat penambahan penguat optik dan DCF dan bagian (b) sistem yang telah mendapatkan tambahan penguat optik dan DCF. Performansi sistem dilihat dari nilai rata-rata *Q-Factor* dan BER untuk masing-masing jarak pengujian yang dapat dilihat pada Tabel 2. Dari nilai tersebut, penambahan penguat optik dan DCF memberikan kenaikan nilai *Q-Factor* yang berarti memiliki kualitas sistem yang lebih baik. Tetapi, dengan bertambahnya jarak pengujian, nilai *Q-Factor* semakin menurun yang disebabkan nilai BER yang bertambah besar.

Tabel 2 Nilai rata-rata *Q-Factor*, BER, dan daya *receiver* hasil simulasi sistem Analog RoF WDM-PON tanpa dan dengan penambahan penguat optik dan DCF

Jarak (km)	<i>Q-Factor</i>		BER		Daya pada receiver	
	Dengan penguat optik dan DCF	Tanpa penguat optik dan DCF	Dengan penguat optik dan DCF	Tanpa penguat optik dan DCF	Dengan penguat optik dan DCF	Tanpa penguat optik dan DCF
40	16,27	1,95	$6,36 \times 10^{-55}$	$2,66 \times 10^{-2}$	-0,67	-18,27
60	14,03	1,45	$1,47 \times 10^{-31}$	$7,21 \times 10^{-2}$	-5,92	-22,52
80	8,92	1,29	$6,40 \times 10^{-17}$	$9,73 \times 10^{-2}$	-11,17	-26,76
100	3,85	1,25	$7,33 \times 10^{-5}$	$1,03 \times 10^{-1}$	-16,42	-31,02
120	1,64	1,27	$4,38 \times 10^{-2}$	$1,01 \times 10^{-1}$	-21,62	-35,27

B. Sistem Digitized RoF 40G WDM-PON

Pada skenario kedua dilakukan simulasi sistem *Digitized* RoF WDM-PON dengan dua kali simulasi. Simulasi pertama dilakukan tanpa menambahkan penguat optik dan DCF, dan simulasi kedua dilakukan dengan menambahkan penguat optik dan DCF pada sistem



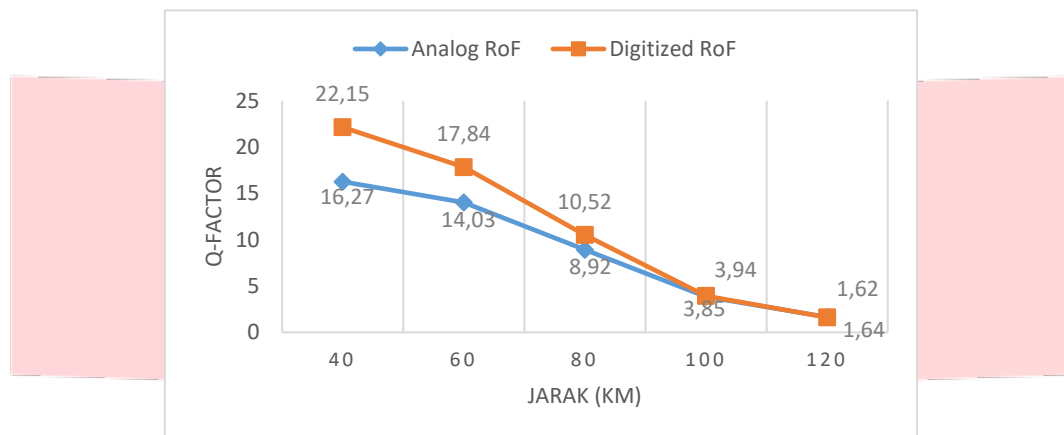
Gambar 9 Bentuk *eye diagram*, nilai BER dan *Q-Factor* sistem *Digitized* RoF WDM-PON pada jarak 40 km (a) tanpa dan (b) dengan penambahan penguat optik dan DCF

Pada Gambar 9 diberikan hasil *eye diagram* dari salah satu kanal dari pengujian skenario dua pada jarak 40 km, dengan bagian (a) sistem yang belum terdapat penambahan penguat optik dan DCF dan bagian (b) sistem yang telah mendapatkan tambahan penguat optik dan DCF. Performansi sistem dilihat dari nilai rata-rata *Q-Factor* dan BER untuk masing-masing jarak pengujian yang dapat dilihat pada Tabel 3. Dari nilai tersebut, penambahan penguat optik dan DCF memberikan kenaikan nilai *Q-Factor* yang berarti memiliki kualitas sistem yang lebih baik. Tetapi, dengan bertambahnya jarak pengujian, nilai *Q-Factor* semakin menurun yang disebabkan nilai BER yang bertambah besar.

Tabel 3 Nilai rata-rata *Q-Factor*, BER, dan daya *receiver* hasil simulasi sistem *Digitized* RoF WDM-PON tanpa dan dengan penambahan penguat optik dan DCF

Jarak (km)	<i>Q-Factor</i>		BER		Daya pada receiver	
	Dengan penguat optik dan DCF	Tanpa penguat optik dan DCF	Dengan penguat optik dan DCF	Tanpa penguat optik dan DCF	Dengan penguat optik dan DCF	Tanpa penguat optik dan DCF
40	22,15	2,36	$1,56 \times 10^{-100}$	$9,45 \times 10^{-3}$	-0,68	-18,31
60	17,84	1,33	$1,14 \times 10^{-55}$	$9,30 \times 10^{-2}$	-5,93	-22,56
80	10,52	1,28	$2,04 \times 10^{-25}$	$1,01 \times 10^{-1}$	-11,18	-26,81
100	3,94	1,29	$4,18 \times 10^{-5}$	$1,02 \times 10^{-1}$	-16,43	-31,06
120	1,62	1,27	$5,34 \times 10^{-2}$	$1,02 \times 10^{-1}$	-21,63	-35,32

Dari dua skenario yang diujikan, kemudian dibandingkan performansi dari kedua sistem dari hasil simulasi yang telah dijalankan. Hasil yang dibandingkan diambil dari nilai rata-rata Q -Factor dan BER pada sistem yang telah mendapatkan penambahan penguat optik dan DCF.



Gambar 10 Grafik perbandingan Q -Factor sistem Analog RoF 40G WDM-PON dengan Digitized RoF 40G WDM-PON

Dari Gambar 10 dapat dilihat pada sistem *Digitized RoF* WDM-PON memiliki performansi yang lebih baik dibandingkan dengan sistem *Analog RoF* WDM-PON, yaitu memiliki nilai rata-rata Q -Factor yang lebih tinggi pada jarak pengujian 40 km, 60 km, dan 80 km. Sedangkan pada jarak pengujian 100 km dan 120 km kedua sistem masih memiliki performansi yang buruk dengan nilai rata-rata Q -Factor yang berada di bawah parameter pengujian. Sinyal radio yang dikonversi menjadi bentuk digital melalui proses digitalisasi yang dilewatkan pada transmisi serat optik dengan *bit rate* tinggi 40 Gbps memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap efek nonlinearitas dari gelombang mikro dan komponen optik.

5. Kesimpulan

Sistem *Analog RoF* dan *Digitized RoF* keduanya dapat diintegrasikan dengan jaringan optik WDM-PON dengan 8 kanal menggunakan spasi kanal 100 GHz pada frekuensi sumber optik 192.2 THz – 192,9 THz, *bit rate* 40 Gbps yang pada sisi *receiver* dibagi kepada dua *end-user*, menggunakan penguat optik dan DCF yang menghasilkan BER di bawah 10^{-12} dan Q -Factor lebih dari 7 pada jarak 40 km, 60 km, dan 80km. Pengkonversian sinyal radio analog menjadi sinyal digital pada sistem *Digitized RoF* memiliki performansi yang lebih baik dibandingkan dengan sistem *Analog RoF* yang membuktikan bahwa sinyal transmisi berbentuk digital lebih tahan terhadap distorsi inter-modulasi yang disebabkan oleh efek nonlinearitas gelombang mikro dan perangkat optik. Penambahan penguat optik dan DCF untuk mengkompensasi dispersi pada transmisi serat optik mampu meningkatkan kualitas transmisi serat optik.

Daftar Pustaka :

- [1] Tornatore, Massimo, et al. *Fiber-Wireless Convergence in Next-Generation Communication Networks: Systems, Architectures, and Management*. Springer International Publishing, 2017.
- [2] Keiser, Gerd. *Optical Fiber Communications*. 2nd ed., McGraw Hill, 1991.
- [3] Agrawal, G. P. *Fiber-Optic Communication Systems*. 3rd ed., John Wiley & Sons, 2002.
- [4] Vyas, Ajay Kumar, and Navneet Agrawal. "Radio over fiber: Future technology of communication." *International Journal of Emerging Trends & Technology in Computer Science (IJETTCS)* 1.2 (2012): 233-237.
- [5] KyungWoon Lee, Jung Ho Park and HyunDo Jung, "Comparison of digitized and analog radio-over-fiber systems over WDM-PON networks," *2013 International Conference on ICT Convergence (ICTC)*, Jeju, 2013, pp. 705-706.
- [6] P. A. Gamage, A. Nirmalathas, C. Lim, D. Novak and R. Waterhouse, "Design and Analysis of Digitized RF-Over-Fiber Links," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 27, no. 12, pp. 2052-2061, June15, 2009.
- [7] A. Nirmalathas, P. A. Gamage, C. Lim, D. Novak and R. Waterhouse, "Digitized Radio-Over-Fiber Technologies for Converged Optical Wireless Access Network," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 28, no. 16, pp. 2366-2375, Aug.15, 2010.
- [8] A. Nirmalathas, C. Lim, and Y. Yang, "Digitized RF over fiber systems," in *Advanced Photonics for Communications*, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2014), paper ST1D.1.

- [9] H. D. Jung, K. W. Lee, J. H. Kim, Y. H. Kwon and J. H. Park, "Performance Comparison of Analog and Digitized RoF Systems with Nonlinear Channel Condition," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 28, no. 6, pp. 661-664, March 15, 2016.
- [10] Pamukti, B., Perdana, D. (2017). Performance Evaluation of DCF Length for High Scalability NG-PON2. *Telkomnika*, 15(1), 165

