



Analisis Perbandingan Kinerja Pengkodean Kanal *Non-Return-to-Zero* (NRZ) dan *Return-to-Zero* (RZ) pada Rancangan Jaringan *Long-haul Dense Wavelength Division Multiplexing* (DWDM)

Comparative Performance Analysis of Non-Return-to-Zero (NRZ) and Return-to-Zero (RZ) on Long-haul Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM) Link

Olivian Bagas Pratama¹, Anggun Fitriani Isnawati², Dodi Zulherman³

^{1,2,3}Program Studi Teknik Telekomunikasi, Fakultas Teknik Telekomunikasi dan Elektro, Institut Teknologi Telkom Purwokerto

^{1,2,3}Jalan D.I. Panjaitan No. 128 Purwokerto, Jawa Tengah-53145

email: ¹bagasvian352@gmail.com, ²anggun@ittelkom-pwt.ac.id, ³zulherman.dodi@ittelkom-pwt.ac.id

INFORMASI ARTIKEL

Naskah diterima 23 Agustus 2019

Direvisi 13 Desember 2019

Disetujui 23 Desember 2019

Keywords:

Fiber Optic

DWDM

NRZ

RZ

Kata kunci :

Serat Optik

DWDM

NRZ

RZ

ABSTRACT

The increasing of coverage area and demand for internet services are both drive the development of providing services with high bitrate transmission and gigantic capacity, such as fiber optic communication. Long-haul DWDM network as a multiplexing technology is very supportive in the long-distance optical transmission link requiring channel coding which can be implemented in transmitter. There are various types of channel coding used in optical fiber communication, such as non-return-to-zero and return-to-zero. The aims of this work are to compare the system performance with different channel coding in long-haul link using variations of optical power launch with value 0, 2, 4, 6, and 8 dBm and variations of length of link with value 200, 400, 600, 800, and 1000 km. The design system uses external modulation and NRZ or RZ on the transmitter, optical Fiber with EDFA amplifier on the optical transmission, and optical detector on the receiver. Based on the results, there are several channels with the Q-factor and BER that do not meet the ITU standards. In addition, the NRZ channel coding is better used in the long-haul DWDM link.

ABSTRAK

Perkembangan jangkauan dan penggunaan internet mendorong pengembangan penyediaan layanan dengan transmisi data yang cepat dan kapasitas yang besar seperti layanan berbasis serat optik. Jaringan *long-haul* DWDM sebagai teknologi multiplexing sangat mendukung proses transmisi optik jarak jauh. Performa media transmisi *long-haul* DWDM membutuhkan teknik pengkodean kanal yang dapat diimplementasikan pada sisi pengirim agar diperoleh sistem yang efisien dalam hal *bandwidth* transmisi. Dalam komunikasi serat optik terdapat beberapa jenis teknik pengkodean kanal yang umum digunakan seperti *non-return-to-zero* (NRZ) dan *return-to-zero* (RZ). Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan kinerja rancangan sistem dengan variasi teknik pengkodean dengan memberikan variasi daya pancar laser sebesar 0, 2, 4, 6, dan 8 dBm dan variasi jarak sebesar 200, 400, 600, 800, dan 1000 km. Rancangan sistem menggunakan modulasi eksternal dan NRZ atau RZ pada sisi *transmitter*, serat optik dan penguat EDFA pada media transmisi, dan detektor optik pada sisi *receiver*. Berdasarkan hasil penelitian, tidak semua kanal sesuai dengan hasil Q-factor dan BER berdasarkan standar ITU-T, namun jenis pengkodean kanal NRZ lebih baik digunakan pada jenis jaringan *long-haul* DWDM.

1. Pendahuluan

Perkembangan teknologi yang pesat dalam beberapa dekade terakhir serta peningkatan kebutuhan internet yang semakin besar mendorong pengembangan teknologi serta media transmisi yang dapat dipergunakan untuk mentransmisikan data dengan cepat dan memiliki kapasitas yang besar seperti serat optik. Serat optik saat ini merupakan pilihan yang sangat tepat untuk dipergunakan sebagai media transmisi karena memiliki kapasitas *bandwidth* yang besar dan menjadi satu-satunya media transmisi yang dapat memenuhi kebutuhan masyarakat modern dalam hal pengiriman data dalam skala sangat besar untuk jarak yang sangat jauh (Erik, 2016). Terdapat beberapa teknologi yang dapat mengoptimalkan penggunaan *bandwidth* yang besar pada serat optik dengan metode penjamakan seperti *time division multiplexing* dan *wavelength division multiplexing* yang pada generasi selanjutnya berkembang menjadi sebuah teknologi DWDM. Teknologi DWDM dianggap paling diunggulkan yang dapat digunakan sebagai media multiplexing karena teknologi tersebut dapat membagi kanal dalam daerah panjang gelombang sehingga lebih mudah untuk diakses dibandingkan oleh pembagian atas dasar waktu pada TDM (Sudarmilah, 2002). Penggunaan pengkodean kanal pada transmisi berbasis DWDM dapat mengoptimalkan keunggulan-keunggulan media serat optik seperti uraian di atas. Pengkodean kanal yang umum dipergunakan seperti NRZ dan RZ dipilih karena *bandwidth* dan relatif lebih mudah untuk dibangkitkan (Agalliu, 2014). Pemilihan format pengkodean tersebut bertujuan agar kinerja sistem yang didapatkan maksimal. Format pengkodean dapat mempengaruhi sebuah kualitas sinyal, kecepatan media pengiriman serta mengurangi efek dispersi (Putra, 2017).

Pemanfaatan jaringan serat optik sebagai jaringan jarak jauh (*long-haul*) biasanya menjadi jaringan utama dalam sistem komunikasi (*core networks*) akan membawa data dalam jumlah yang sangat besar dan melintasi cakupan wilayah luas. Sehingga perencanaan jaringan dalam hal pemilihan metode modulasi, pengaturan degradasi sinyal seperti dispersi dan atenuasi perlu diperhatikan (Meenakshi, 2015). Selain itu pemilihan metode modulasi juga harus menjadi perhatian utama dalam perencanaan jaringan akses berbasis teknologi *passive optical network* (PON) (Malti, 2012).

Penelitian yang telah kami lakukan bertujuan untuk mengamati perbandingan kinerja jaringan *long-haul* DWDM dengan penggunaan pengkodean kanal NRZ dan pengkodean kanal RZ. Selain memodelkan sistem dengan dua jenis pengkodean tersebut, pengaturan degradasi sinyal juga diterapkan seperti penggunaan DCF sebagai kompensator dispersi dan EDFA sebagai penghapus pengaruh atenuasi. Pengamatan dilakukan pada sebuah model sistem yang dirancang pada perangkat simulator dengan memberikan variasi pengujian pada nilai daya pancar optis dan panjang serat optik pada link DWDM. Pengukuran kinerja menggunakan parameter BER dan Q-factor dengan merujuk pada acuan standar ITU-T. Tulisan ini kami susun dalam beberapa bagian yang meliputi tinjauan pustaka, metode penelitian, hasil penelitian dan pembahasan, dan simpulan.

2. Tinjauan Pustaka

Penelitian terkait dengan perancangan jaringan optik dengan teknik pengkodean atau format modulasi tertentu telah dilakukan oleh beberapa peneliti sebelumnya. Rajat Paliwal pada tahun 2017 membahas tentang peningkatan kinerja link optik DWDM pada komunikasi optik berkecepatan tinggi (10 Gbps) (Paliwal, 2017). Paliwal membahas tentang cara untuk meningkatkan performa sebuah *link* optik DWDM 10 Gbps dengan dengan membandingkan hasil Q-factor dan BER menggunakan dua jenis pengkodean yaitu NRZ dan RZ. Penelitian Paliwal menggunakan 32 kanal dengan spasi kanal 100 GHz dan panjang *link* optik 50 km serta menggunakan *dispersion compensating fiber* (DCF) sepanjang 10 km. Penelitian tersebut mengamati kinerja pada kanal 1, 8, dan 16. Berdasarkan hasil pembahasan, nilai Q-factor dan BER pada pengkodean kanal NRZ lebih baik dibandingkan dengan pengkodean kanal RZ. Pada penelitian Famarz E. Seraji dan Marzieh Sadat Kiaee pada tahun 2017 membahas tentang evaluasi hasil Eye-Diagram pada modulasi RZ dan NRZ dengan *bitrate* 10 Gb/s dan 160 Gb/s pada jaringan WDM (Famarz, 2017). Penelitian Famarz menggunakan pengkodean RZ dan NRZ pada panjang link 100 km dan 400 km. Penelitian tersebut menggunakan 32 kanal dengan penguat EDFA. Hasil dari simulasi dengan *bitrate* 10 Gb/s pada panjang *link* 100 dan 400 km berdasarkan nilai Q-factor dan BER, disimpulkan bahwa NRZ lebih

baik digunakan, sedangkan dengan *bitrate* 160/s Gb pada panjang *link* yang sama, modulasi RZ lebih diunggulkan. Penelitian Zulia Nurul Karimah, Akhmad Hambali, dan Suwandi membahas Analisis Perbandingan Kinerja Mach-Zehnder berdasarkan Ragam Format Modulasi pada Jaringan FTTH (Zulia, 2017). Zulia menggunakan teknologi GPON dengan rancangan penelitian menggunakan serat optik yang diberikan efek non-linier. Pengukuran jarak dilakukan menggunakan *software Google Earth* dari STO yang terdapat perangkat OLT dan FTM, ke ODC, dari ODC ke ODP, dan dari ODP akan diarahkan menuju roset di rumah pelanggan, yang kemudian berakhir di ONT. Jarak total terjauh yang didapatkan adalah sepanjang 6161,84 m dengan panjang kabel feeder 4840 m, kabel distribusi 1224,11 m dan kabel drop 97,73 m. Skema modulasi rancangan menggunakan pengkodean kanal NRZ, RZ, CSRZ, RZ-DPSK, dan RZ-DQPSK. Berdasarkan hasil penelitian jenis pengkodean kanal NRZ diunggulkan sesuai hasil yang didapatkan pada Q-factor dan BER. Penelitian Prabhdeep Kaura, Amit Guptab, dan Mandeep Chaudhary pada tahun 2015 membahas tentang Analisis Perbandingan Optical Wireless Satelit pada modulasi NRZ dan RZ dengan Variasi Daya (Prabhdeep, 2015). Prabhdeep membahas tentang jaringan nirkabel optik pada satelit dengan pengkodean kanal NRZ dan RZ menggunakan penguat daya yang berbeda. Penelitian tersebut menggunakan system OWC pada sisi satelit. Rancangan menggunakan multiplexing DWDM dengan 32 kanal, IS-OWC channel, dan penguat optik dengan jarak link optik 5000 km dan variasi daya 10, 20, dan 30 dBm. Hasil penelitian tersebut mendapatkan nilai Q-factor dan BER menggunakan jenis pengkodean kanal NRZ unggul dari semua daya yang digunakan.

Sejalan dengan penelitian di atas, penelitian berikut juga membuktikan pengkodean kanal NRZ lebih baik dibandingkan dengan pengkodean kanal RZ pada beberapa model sistem. Penelitian Rajesh Mishra, N.K. Shukla, mohd. Atif, dan C.K. Dwivedi pada tahun 2018 membahas tentang analisis performansi DWDM 8 kanal menggunakan Dispersion Compensating Fiber menggunakan skema modulasi NRZ, RZ, dan CSRZ (Rajesh, 2018). Penelitian tersebut menggunakan multiplexing DWDM dengan 8 kanal menggunakan DCF dan skema modulasi NRZ, RZ, dan CSRZ. Panjang DCF yang digunakan 14 km dan SMF 86 km dengan *bitrate* 10 Gbps dan panjang gelombang 1550 nm. Spasi kanal yang digunakan 100 Ghz dengan variasi daya 3 dan 7 dBm. Berdasarkan hasil penelitian jenis pengkodean kanal CSRZ mendapatkan hasil Q-factor dan BER yang lebih baik dibandingkan NRZ dan RZ. Penelitian Dwiki Kurnia, Akhmad Hambali, dan Brian Pamukti tahun 2017 membahas tentang Analisis Performansi Jenis Format Modulasi Pada NG-PON2 Menggunakan Teknologi TWDM (Dwiki, 2017). Dwiki menganalisis pengaruh jenis format modulasi terhadap performa dari jaringan NG-PON2 berbasis TWDM. Perlu dilakukan beberapa skenario simulasi, pertama dengan mengubah format modulasi yang digunakan dengan RZ, NRZ, RZ-DPSK, dan RZ-DQPSK. Skenario kedua dengan mengubah agregasi OLT, yaitu 4λ dan 8λ pada setiap skenario pertama. Berdasarkan hasil penelitian kedua skenario tersebut diperoleh hasil Q-factor dan BER yang paling baik, yaitu format modulasi NRZ.

Penelitian Cheikh Kherici dan Malika Kandouci tahun 2019 membahas tentang perbandingan antara sistem WDM dan DWDM pada transmisi optik menggunakan 40 Gbps (Kandouci, 2019). Penelitian tersebut membandingkan antara sistem WDM dan DWDM menggunakan modulasi NRZ dan RZ. Penelitian tersebut menggunakan kanal sebanyak 8 dan 16 dengan spasi kanal 100 GHz. Skema perbandingan pada penelitian tersebut membandingkan hasil nilai Q-factor dan BER dengan menambahkan efek linier dan non linier. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa pengkodean kanal RZ lebih diunggulkan digunakan pada sistem WDM, sedangkan pengkodean kanal NRZ lebih cocok digunakan pada sistem DWDM.

Penelitian lainnya oleh Suresh Kumar dan Deepak Sharma tahun 2017 yang membahas tentang analisis performa modulasi NRZ dan RZ pada skema *link* serat optik menggunakan penguat EDFA (Suresh, 2017). Penelitian tersebut menggunakan 32 kanal dengan *link* optik sepanjang 100 km. Penelitian tersebut membandingkan hasil performansi NRZ dan RZ menggunakan hasil Q-Factor dan BER (Bit Error Rate) pada variasi jarak jaringan 60, 80, dan 100 km dengan besar gelombang *pump source* 980 nm dan 1480 nm. Hasil dari penelitian tersebut, nilai *Q-factor* dan BER sepanjang *link* optik 100 km dengan *pump source* 980 nm dan 1480 nm dan format RZ, lebih baik untuk digunakan. Penelitian Senthamizhielven et al tahun 2014 juga membuktikan bahwa pengkodean tipe RZ lebih baik dibandingkan dengan tipe NRZ (Senthamizhielven,

2014). Penelitian ini menggunakan pemodelan sistem DWDM dengan jumlah kanal 20 buah, frekuensi kanal 193,1 THz, dan spasi kanal 100 GHz. Selain itu, peneliti juga memodelkan sistem dengan penggunaan DCF, EDFA, dan SMF pada media transmisinya. Pemodelan yang digunakan dalam penelitian Senthamizhielven menjadi dasar perancangan sistem DWDM *long-haul* pada penelitian ini.

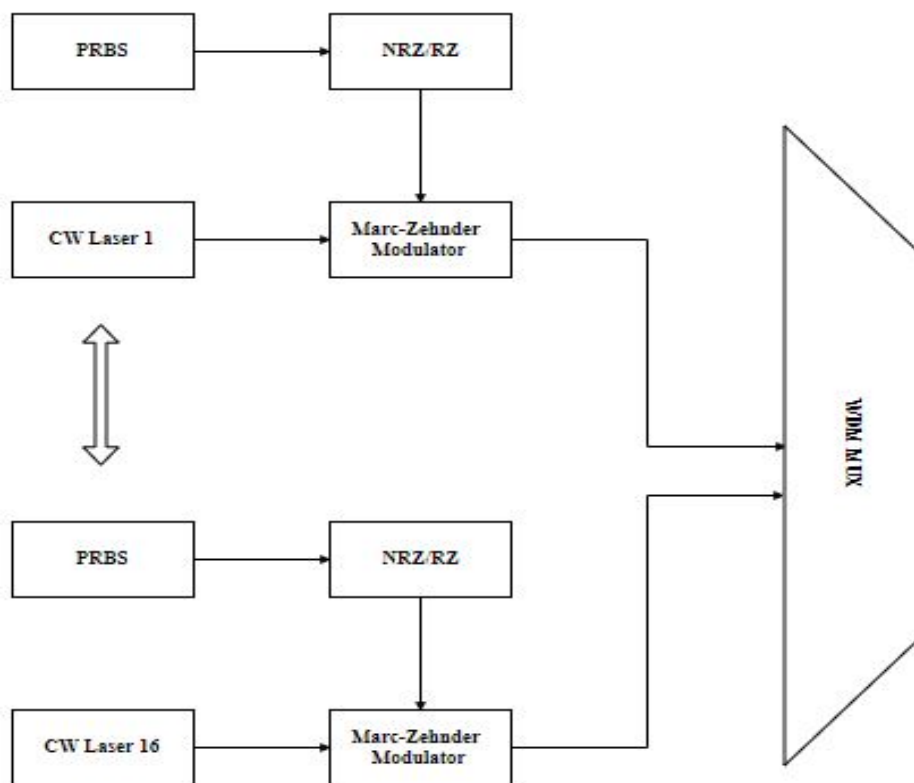
3. Metode Penelitian

Penelitian perbandingan pengkodean kanal pada jaringan DWDM jarak jauh ini dilaksanakan dalam beberapa tahapan yaitu studi literatur, penentuan parameter rancangan, perancangan sistem, pengujian rancangan, penganalisisan hasil pengujian, serta pembentukan simpulan. Studi literatur dilakukan untuk menentukan model-model pemecahan masalah dalam pembentukan rancangan jaringan DWDM jarak jauh sebagai tahapan awal. Tahapan berikutnya memanfaatkan hasil studi literatur dalam penentuan parameter rancangan, kemudian parameter-parameter tersebut digunakan pada saat perancangan model jaringan perangkat simulasi Optisystem. Setelah mendapatkan rancangan sistem, penelitian dilanjutkan dengan proses pengujian dan penganalisisan. Analisis dilakukan dengan pendekatan deskriptif kuantitatif dimana hasil pengujian dibandingkan dalam satu grafik dan dijelaskan secara deksriptif berdasarkan nilai BER, *Q-factor* dan parameter *eyediagram*.

Rancangan jaringan *long-haul* DWDM terdiri dari tiga bagian subsistem yaitu blok pengirim, blok media pengirim, dan blok penerima. Berikut penjelasan tentang model rancangan sistem dalam penelitian.

3.1. Blok Pengirim (*Transmitter*)

Blok *transmitter* terdiri dari pengaturan frekuensi, daya, jenis pengkodean kanal, serta *bitrate* yang digunakan. Pengkodean kanal yang digunakan pada penelitian adalah NRZ dan RZ. Kanal yang digunakan sebanyak 16 kanal dengan frekuensi L-Band menggunakan spasi kanal 100 GHz dengan daya 0, 2, 4, 6, dan 8 dBm. Prinsip kerja pada blok *transmitter* adalah PRBS mengirimkan bit-bit yang membawa informasi



Gambar 1. Konfigurasi Rancangan Blok Pengirim (*Transmitter*)

menuju NRZ atau RZ *Pulse Generator* untuk dikodekan. Di sisi lain CW Laser mengirimkan sinyal optik, pada komponen ini terdapat parameter yang diatur yaitu daya dan panjang gelombang. Setelah itu sinyal keluaran dari NRZ atau RZ *Pulse Generator* dan CW Laser menuju *Mach-Zehnder Modulator*. Pada *Mach-Zehnder Modulator* terjadi proses modulasi sinyal, kemudian menghasilkan keluaran sinyal optik.

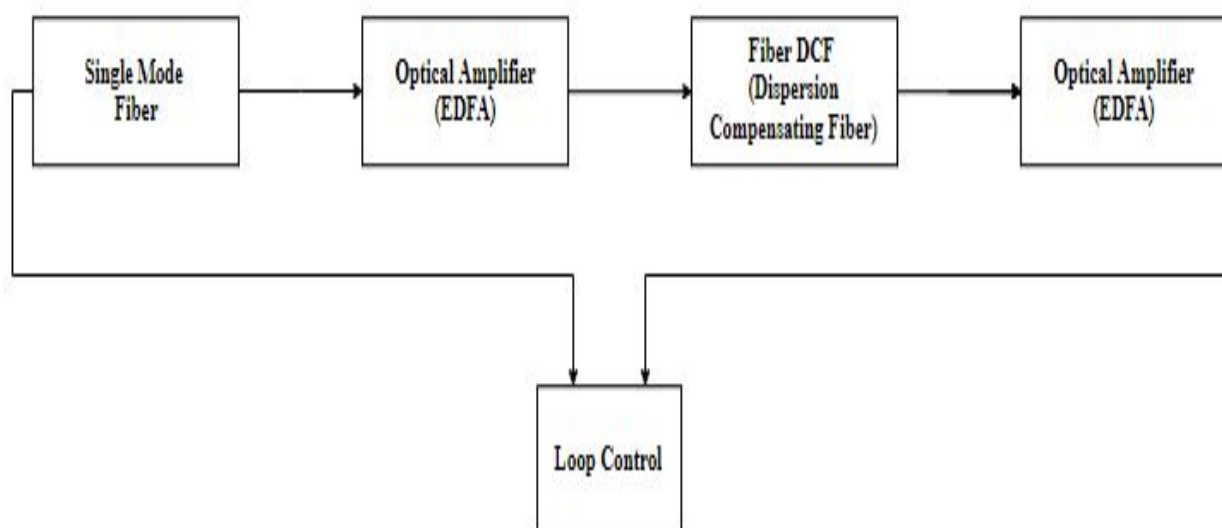
Hasil keluaran sinyal dari *Mach-Zehnder Modulator* menuju WDM *Multiplexer* untuk digabungkan sesuai panjang gelombangnya dan ditransmisikan kepada blok media transmisi atau media pengiriman. Keterkaitan antar komponen PRBS, CW Laser, NRZ/RZ *generator*, *Mach-Zehnder Modulator*, dan *multiplexer* digambarkan pada gambar 1, sedangkan nilai parameter masing-masing blok pada subsistem disajikan pada tabel 1.

Tabel 1. Parameter Rancangan Blok Pengirim (*Transmitter*)

Parameter	Nilai	Satuan
Frekuensi	189,6 - 191,1	THz
Daya Pancar CW Laser	0, 2, 4, 6, 8	dBm
Spasi Kanal	100	GHz
Kecepatan Transmisi Data	40	Gbps
Jumlah Kanal	16	-
<i>Insertion Loss Multiplexer</i>	5	dB

3.2. Blok Media Pengirim

Blok media pengirim terdiri dari serat optik, *Erbium Doped Optical Amplifier (EDFA)*, dan *loop control*. Serat optik yang digunakan berjenis *single mode* dan *Dispersion Compensating Fiber* (jenis kompensator yang digunakan untuk menangani masalah dispersi pada serat optik). Pada blok media pengirim, sinyal yang ditransmisikan di sepanjang serat optik akan mengalami degradasi sinyal, sehingga ditambahkan penguat optik untuk mengatasi pelemahan sinyal yang terjadi akibat proses transmisi. Setelah melewati blok



Gambar 2. Konfigurasi Rancangan Blok Media Pengirim

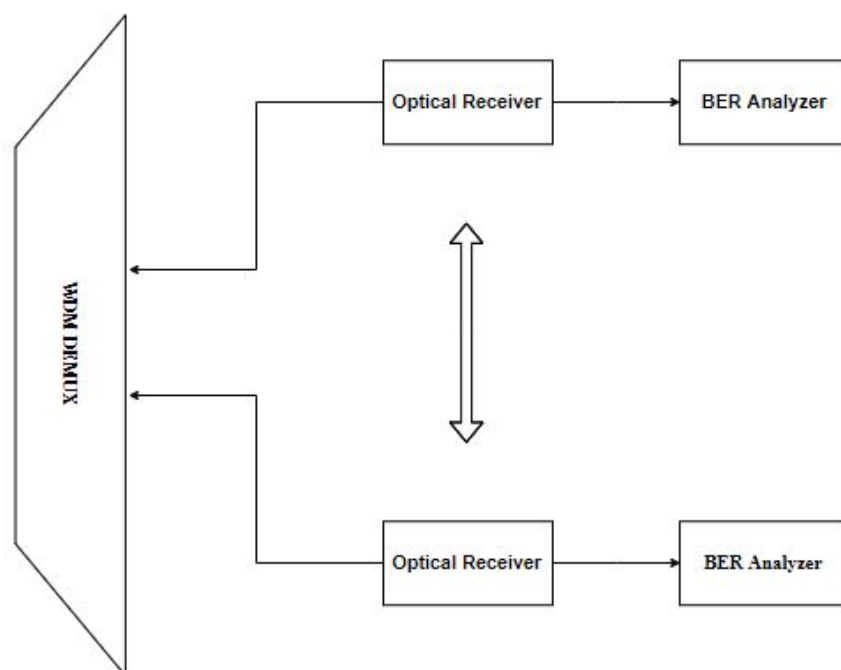
transmisi, sinyal didemultiplexikan pada komponen WDM *demultiplexer* dan ditujukan ke tujuan masing-masing pada blok penerima. Gambar 2 menampilkan konfigurasi dari blok pengirim, sedangkan tabel 2 menyajikan nilai parameter yang digunakan pada blok pengirim.

Tabel 2. Parameter Rancangan Blok Media Pengirim

Jenis Komponen	Parameter	Nilai	Satuan
<i>Single Mode Fiber (SMF)</i>	Panjang	200; 400; 600; 800; 1000	km
	Atenuasi	0,18	dB/km
	Dipersi	18	ps/(nm.km)
<i>Dispersion Compensating Fiber (DCF)</i>	Panjang	50	km
	Atenuasi	0,24	dB/km
	Dispersi	-54	ps/(nm.km)
<i>Erbium Doped Fiber Amplifier (EDFA)</i>	<i>Gain</i>	20	dB
	<i>Noise Figure</i>	4	dB

3.3. Blok Penerima (*Receiver*)

Blok *receiver* terdiri dari WDM *demultiplexer*, *optical receiver*, dan BER *analyzer*. *Optical receiver* terdiri dari detektor penerima berjenis APD dan menggunakan jenis filter *low pass bassel filter* dengan frekuensi *cut-off* 7,5 GHz. Pada blok *receiver*, hasil sinyal optis yang telah diterima *demultiplexer* akan menuju *photodetector* yang didemodulasi ke bentuk sinyal elektrik, kemudian sinyal tersebut dilewatkan menuju *Low Pass Bessel Filter*. Filter ini berada pada sisi penerima yang digunakan untuk menyaring *noise* dari sinyal hasil proses transmisi. Selain itu, terdapat bagian BER *analyzer* yang digunakan untuk mengetahui kualitas yang diterima melalui nilai *Q-factor*, BER, dan *Eye Diagram*. Gambar 3 menampilkan



Gambar 3. Konfigurasi Rancangan Blok Media Penerima

konfigurasi rancangan blok penerima, sedangkan nilai parameter rancangan pada blok ini ditampilkan pada tabel 3.

Tabel 3. Parameter Rancangan Blok Penerima

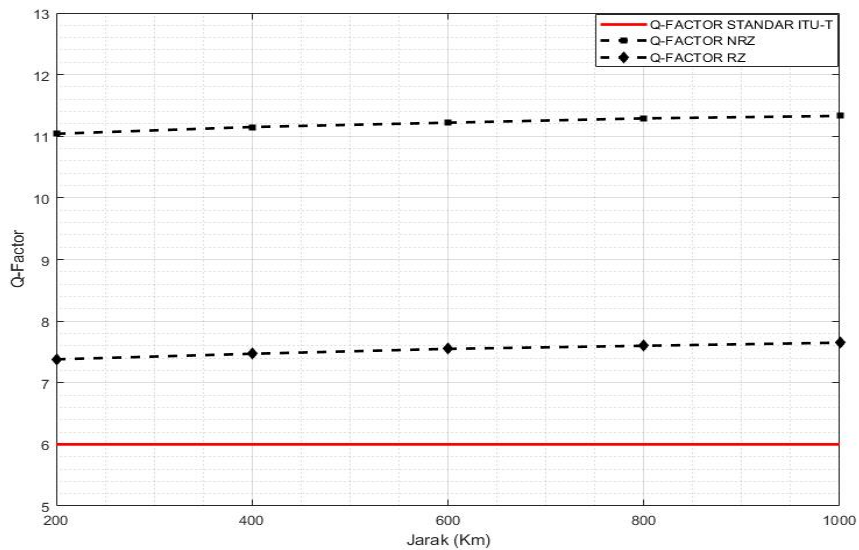
Parameter	Nilai	Satuan
Jumlah Kanal	16	-
<i>Insertion Loss</i>	4,7	dB
Responsivitas APD	1	A/W
Gain APD	3	dB
Frekuensi <i>Cut-Off LBBPF</i>	750	MHz

4. Hasil Penelitian dan Pembahasan

Rancangan yang telah dijabarkan pada bagian metode penelitian diimplementasikan pada *software Optisystem* untuk diukur kinerja rancangan tersebut. Skenario pengujian menggunakan dua variasi, yaitu nilai daya pancar dan panjang jaringan untuk kedua tipe pengkodean kanal. Kinerja rancangan sistem diukur menggunakan lima parameter yang bersumber dari *eye-diagram* dengan rincian BER, *Q-factor*, distorsi, *jitter*, dan SNR. Hasil pengujian sistem disajikan dalam tiga bagian secara berurutan dari *Q-factor*, BER, dan *Eye-Diagram*.

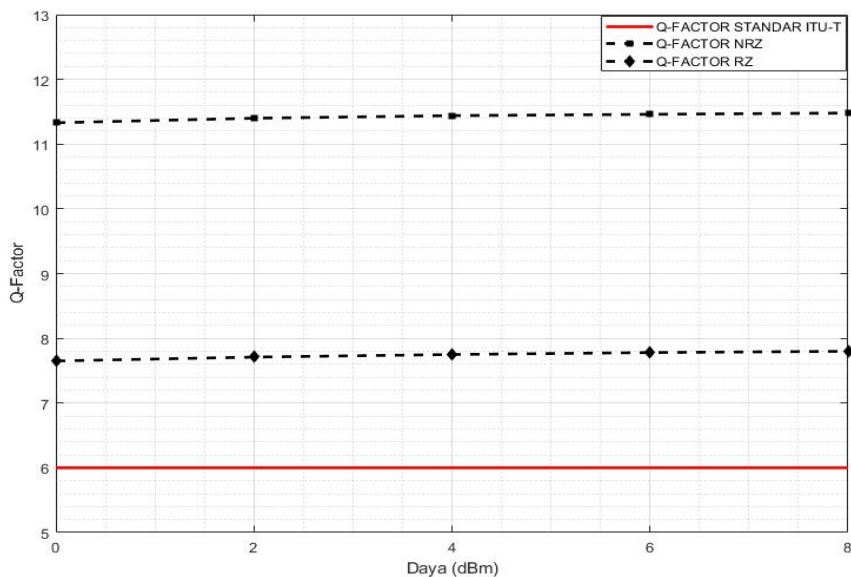
4.1. Perbandingan Kinerja Sistem DWDM dengan Pengkodean Kanal NRZ dan RZ berdasarkan Nilai Rata-rata *Q-factor*

Berdasarkan pengujian sistem, variasi jarak jangkauan jaringan dengan daya pancar optik tetap 0 dBm diperoleh hasil pada gambar 4. Penyajian hasil merupakan nilai rata-rata dari *Q-factor* sistem dengan variasi jarak sejauh 200 km, 400 km, 600 km, 800 km, dan 1000 km. Hasil nilai *Q-factor* menggunakan modulasi NRZ pada jarak 200 km bernilai 11,04; jarak 400 km bernilai 11,15; jarak 600 km bernilai 11,22; jarak 800 km bernilai 11,29; dan jarak 1000 km bernilai 11,33. Semua nilai *Q-factor* untuk variasi jarak pada penggunaan tipe pengkodean kanal NRZ memenuhi kriteria unjuk kerja yang ditentukan oleh standar ITU-T dengan nilai di atas 6. Hasil yang sama juga dihasilkan pada pengujian sistem dengan pengkodean kanal tipe RZ bahwa semua variasi jarak memenuhi standar yang ditetapkan oleh ITU-T. Hasil pengujian sistem dengan tipe pengkodean kanal RZ mendapatkan nilai *Q-factor* pada jarak 200 km bernilai 7,38; jarak 400 km bernilai 7,47; jarak 600 km bernilai 7,55; jarak 800 km bernilai 7,60; dan jarak 1000 km bernilai 6,65. Berdasarkan hasil pengujian dengan variasi jarak ini, nilai *Q-factor* untuk sistem yang menggunakan tipe pengkodean kanal NRZ atau RZ memenuhi kriteria unjuk kerja sistem. Berdasarkan tampilan pada gambar 4, perubahan nilai *Q-factor* yang diakibatkan oleh perbedaan jarak menampilkan peningkatan yang semakin besar namun tidak signifikan serta nilai *Q-factor* pada sistem dengan tipe pengkodean NRZ lebih baik dibandingkan dengan tipe pengkodean RZ. Perancangan sistem dengan tipe pengkodean kanal NRZ lebih disarankan dibandingkan dengan tipe pengkodean kanal RZ dan penggunaan penguat EDFA dapat menjaga kinerja sistem tetap stabil hingga jarak ribuan kilometer.



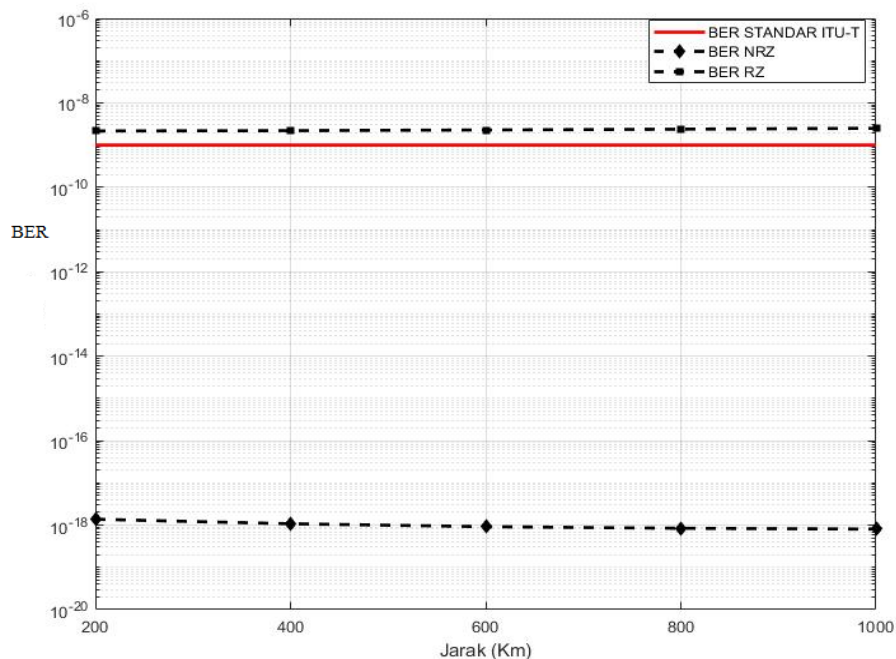
Gambar 4. Grafik perbandingan nilai *Q-factor* pada sistem DWDM dengan pengkodean kanal NRZ dan RZ terhadap variasi panjang jaringan

Pengamatan perbandingan unjuk kerja sistem NRZ dan RZ pada jaringan DWDM selanjutnya dilakukan melalui variasi daya pancar optis pada sisi pengirim. Pengujian unjuk kerja sistem menggunakan variasi daya sebesar 0, 2, 4, 6, dan 8 dBm dengan jarak 1000 km. Berdasarkan hasil pengujian didapatkan grafik perbandingan seperti ditampilkan pada gambar 5. Perbandingan nilai yang dihasilkan berdasarkan variasi daya pancar optis serupa dengan hasil pada variasi jarak. Nilai *Q-factor* yang didapatkan pada sistem NRZ pada daya 0 dBm bernilai 11,33; daya 2 dBm bernilai 11,40; daya 4 dBm bernilai 11,44; daya 6 dBm bernilai 11,46; dan daya 8 dBm bernilai 11,48. Sedangkan hasil yang didapatkan pada sistem RZ dengan daya 0 dBm bernilai 7,65; daya 2 dBm bernilai 7,71; daya 4 dBm bernilai 7,75; daya 6 dBm bernilai 7,78; dan daya 8 dBm bernilai 7,80. Kedua variasi menunjukkan kinerja yang telah memenuhi standar ITU-T, dimana kinerja sistem NRZ lebih baik dibandingkan dengan sistem RZ. Peningkatan nilai daya pancar memberikan efek peningkatan nilai *Q-factor*, namun kenaikan nilai tersebut tidak terlalu signifikan, bahkan rancangan sistem masih dapat bekerja pada daya rendah. Berdasarkan hasil pengujian dengan variasi daya pancar optis dan variasi jarak, rancangan sistem DWDM dengan tipe pengkodean kanal NRZ lebih disarankan, sedangkan daya optis disarankan sebesar 0 dBm.



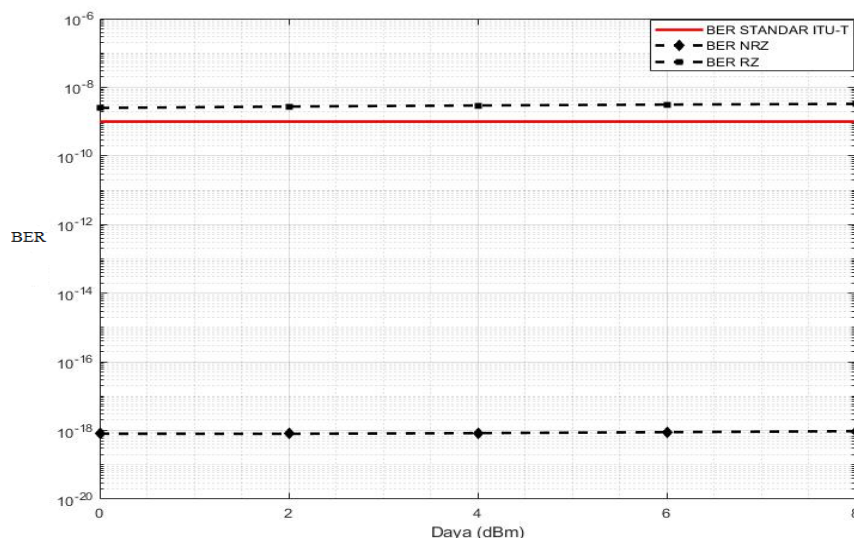
Gambar 5. Grafik perbandingan nilai *Q-factor* pada sistem DWDM dengan pengkodean kanal NRZ dan RZ terhadap variasi daya pancar optis

4.2. Perbandingan Kinerja Sistem DWDM dengan Pengkodean Kanal NRZ dan RZ berdasarkan Nilai *Bit Error Rate* (BER)



Gambar 6. Grafik perbandingan nilai BER pada sistem DWDM dengan pengkodean kanal NRZ dan RZ terhadap variasi panjang jaringan

Berdasarkan pengujian sistem dengan melakukan variasi jarak jangkauan jaringan dengan daya pancar optik tetap 0 dBm diperoleh hasil seperti tampilan pada gambar 6. Penyajian hasil merupakan nilai rata-rata dari BER sistem dengan variasi jarak sejauh 200 km, 400 km, 600 km, 800 km, dan 1000 km. Nilai BER pada sistem yang menggunakan modulasi NRZ pada jarak 200 km bernilai $1,38 \times 10^{-18}$, jarak 400 km bernilai $1,08 \times 10^{-18}$, jarak 600 km bernilai $9,21 \times 10^{-19}$, jarak 800 km bernilai $8,43 \times 10^{-19}$, dan jarak 1000 km bernilai $8,07 \times 10^{-19}$. Penggunaan tipe pengkodean kanal pada sistem DWDM untuk semua variasi panjang telah memenuhi standar ITU-T dengan nilai di bawah 1×10^{-9} . Berbeda dengan hasil pengujian pada sistem DWDM dengan pengkodean kanal NRZ, hasil pengujian tipe RZ menunjukkan semua nilai BER dengan variasi jarak berada di bawah standar ITU-T. Nilai BER untuk sistem dengan pengkodean kanal RZ sebagai berikut: jarak 200 km bernilai $2,16 \times 10^{-9}$, jarak 400 km bernilai $2,20 \times 10^{-9}$, jarak 600 km bernilai $2,28 \times 10^{-9}$, jarak 800 km bernilai $2,38 \times 10^{-9}$, dan jarak 1000 km bernilai $2,50 \times 10^{-9}$. Sesuai standar nilai BER yang ditetapkan yaitu lebih kecil dari 10^{-9} maka sistem dengan pengkodean RZ tidak layak digunakan. Hasil perbandingan nilai rata-rata skema pengkodean NRZ lebih baik dibandingkan dengan skema pengkodean RZ. Perancangan sistem dengan tipe pengkodean kanal NRZ lebih disarankan dibandingkan dengan tipe pengkodean kanal RZ dan penggunaan penguat EDFA dapat menjaga kinerja sistem tetap stabil hingga jarak ribuan kilometer sama seperti pada pembahasan sebelumnya.

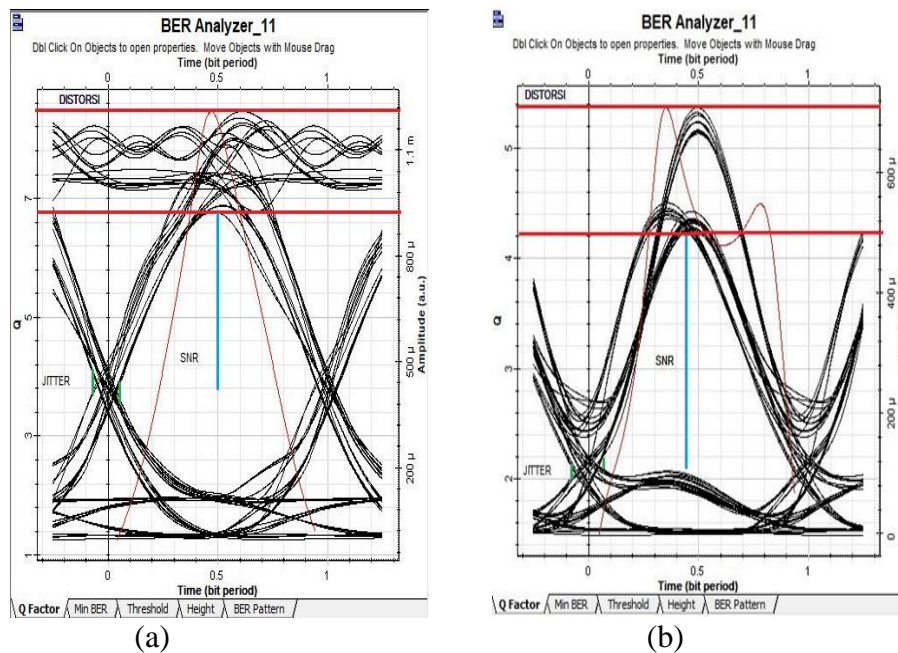


Gambar 7. Grafik perbandingan nilai Q -factor pada sistem DWDM dengan pengkodean kanal NRZ dan RZ terhadap variasi daya pancar optis

Hasil pengamatan kinerja sistem berdasarkan nilai BER dengan variasi daya pancar optis ditampilkan pada gambar 7. Nilai BER yang dihasilkan pada sistem dengan tipe pengkodean kanal NRZ lebih baik dibandingkan dengan sistem dengan tipe pengkodean kanal RZ. Berdasarkan hasil pengujian dengan skema daya 0, 2, 4, 6, dan 8 dBm pada jarak 1000 km, nilai BER didapatkan dengan rincian daya 0 dBm bernilai $8,07 \times 10^{-19}$, daya 2 dBm bernilai $8,02 \times 10^{-19}$, daya 4 dBm bernilai $8,40 \times 10^{-19}$, daya 6 dBm bernilai $8,96 \times 10^{-19}$, dan daya 8 dBm bernilai $9,59 \times 10^{-19}$. Sedangkan hasil BER menggunakan jenis pengkodean kanal RZ dengan rincian daya 0 dBm bernilai $2,50 \times 10^{-9}$, daya 2 dBm bernilai $2,74 \times 10^{-9}$, daya 4 dBm bernilai $2,95 \times 10^{-9}$, daya 6 dBm bernilai $3,13 \times 10^{-9}$, dan 8 dBm bernilai $3,28 \times 10^{-9}$. Dari kedua hasil perbandingan tersebut, diperoleh bahwa modulasi NRZ lebih baik digunakan pada kinerja *long-haul* DWDM.

4.3. Perbandingan Kinerja Sistem DWDM dengan Pengkodean Kanal NRZ dan RZ berdasarkan Parameter-parameter di *Eye-diagram*

Pengamatan unjuk kerja sistem menggunakan *eye diagram* dilakukan hanya pada kanal 11, daya pancar optis 0 dBm, dan jarak 1000 km karena kinerja sistem pada konfigurasi ini dapat mewakili kinerja semua kanal lainnya. Berdasarkan hasil pengamatan terhadap *eye diagram*, unjuk kerja sistem dengan pengkodean NRZ menghasilkan nilai distorsi sebesar $283,931 \mu.a.u.$, nilai *jitter* sebesar $0,0472 ns$, dan nilai SNR sebesar 3 dB. Sedangkan hasil pengujian terhadap sistem RZ diperoleh nilai *jitter* sebesar $0,0564 ns$, nilai distorsi sebesar $106,684 \mu.a.u.$, dan nilai SNR sebesar 2,3 dB. Tampilan *eye diagram* dari sistem DWDM dengan pengkodean kanal NRZ dan RZ ditampilkan pada gambar 8. Berdasarkan hasil pengukuran kinerja berdasarkan parameter-parameter di *eye-diagram*, penggunaan tipe NRZ lebih baik dibandingkan dengan tipe RZ pada sistem DWDM 16-kanal.



Gambar 8. Perbandingan kinerja sistem DWDM berdasarkan *eye-diagram* (a) tipe NRZ, (b) tipe RZ

Perbandingan kinerja sistem NRZ dan RZ berdasarkan variasi jarak dengan daya pancar optis konstan sebesar 0 dBm ditampilkan pada tabel 4. Berdasarkan data yang disajikan terlihat bahwa kinerja sistem NRZ lebih baik dari RZ.

Tabel 4. Perbandingan Unjuk Kerja Rancangan Sistem dengan NRZ dan RZ dengan variasi jarak pada daya 0 dBm

Parameter Jarak (km)	NRZ		RZ	
	Q-factor	BER	Q-factor	BER
200	11,04	$1,38 \times 10^{-18}$	7,38	$2,16 \times 10^{-09}$
400	11,15	$1,08 \times 10^{-18}$	7,47	$2,20 \times 10^{-09}$
600	11,22	$9,21 \times 10^{-19}$	7,55	$2,28 \times 10^{-09}$
800	11,29	$8,43 \times 10^{-19}$	7,60	$2,38 \times 10^{-09}$
1000	11,33	$8,07 \times 10^{-19}$	6,65	$2,50 \times 10^{-09}$

5. Simpulan dan Saran

Berdasarkan hasil perancangan dan pengujian sistem DWDM 16 kanal dan *bitrate* 40 Gbps dengan dua tipe pengkodean kanal yaitu NRZ dan RZ, kinerja sistem dengan tipe NRZ lebih baik dibandingkan dengan tipe RZ dengan parameter unjuk kerja nilai *Q-factor*, BER, distorsi, dan *jitter*. Penelitian selanjutnya dapat menggunakan dengan variasi *bitrate* yang semakin besar, dikarenakan seiring kemajuan teknologi *bandwidth* yang dibutuhkan akan semakin besar dan kecepatan pengiriman data akan semakin tinggi.

6. Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih dari penulis kepada kedua pembimbing, Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat, serta pihak-pihak yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan penelitian ini.

Daftar Pustaka

- Agalliu, R. and Michel Lucki. (2014). Benefits and Limits of Modulation Formats for Optical Communication. *Journal Optics and Optoelectronics*. 12(2), 160-167
- Dwiki Kurnia, A. H. (2017). Analisis Performansi Jenis Format Modulasi Pada NG-PON2 Menggunakan Teknologi TWDM. *Proceedings Seminar Nasional Pendidikan Teknik Elektro* , 136-143.
- Erik Agrell et al, (2016). Roadmap of Optical Communications. *Journal of Optics*, 18, 1-40
- Faramarz E. Seraji, M. S. (2017). Eye-Diagram-Based Evaluation of RZ and NRZ Modulation Methods in a 10-Gb/s Single-Channel and a 160-Gb/s WDM Optical Networks. *International Journal of Optics and Application*, 7(2), 31-36.
- Kandouci, C. K. (2019). Comparative Study Between the WDM System and the DWDM in an Optical Transmission Link at 40 Gb/s. *Laboratory of Electronic Photonic and Optoelectronic*, 488-498.
- Malti et al. (2012). Comparison of CSRZ, DRZ, and MDRZ modulation formats for high bit-rate WDM-PON system using AWG. *Internasional Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. 2(6), 83-87.
- Meenakshi et al, (2015). Comparative analysis of different dispersion compensation technique on 40 Gbps DWDM system. *International Journal of Technology Enhancement and Emerging Engineering Research*. 3(6), 34-38.
- Paliwal, R. (April 2017). Enhancing Performance of 10 Gbps DWDM Optical Link for High Speed Optical Communication. *International Journal of Innovative Studies in Sciences and Engineering Technology*, 3(4), 30-36.
- Prabhdeep Kaura, A. G. (2015). Comparative analysis of Inter satellite Optical Wireless Channel for NRZ and RZ modulation formats for different levels of input power . *Procedia Computer Science* , 572-577.
- Putra, A. R. (2017). Pengujian dan simulasi hybrid coarse wavelength division multiplexing/time division multiplexing – passive optical network (CWDM/TDM-PON) pada Next Generation Passive Optical Network Stage-2 (NG-PON2). Bandung: Universitas Telkom
- Rajesh Mishra, N. S. (2018). Performance Analysis of 8 Channel DWDM Systems via Dispersion Compensation Fiber Using NRZ, RZ, CSRZ Modulation Schemes . *International Conference on Computer Communication and Informatics* .
- Senthamizhselvan, V. et al. (2014). Performance analysis of DWDM based fiber optic communication with different modulation schemes and dispersion compensation fiber. *International Journal of Research in Engineering and Technology*. 3(3), 287-290
- Sudarmilah, E. (2002). Dense wavelength division multiplexing (DWDM) sebagai solusi krisis kapasitas *bandwidth* pada transmisi data. *Jurnal Teknik Elektro*, 2 (1), -
- Suresh Kumar, D. S. (Agustus 2017). Performance Analysis of NRZ and RZ Modulation Schemes in Optical Fiber Link Using EDFA. *International Journals of Advance Research in computer Science and Software Engineering*, 7(8), 161 - 168.
- Zulia Nurul Karimah, A. H. (2017). Analisis Perbandingan Kinerja Mach-Zehnder berdasarkan Ragam Format Modulasi pada Jaringan FTTH. *Jurnal ELKOMIKA*, 5, 73-92.