

## PENGARUH KABEL DISPERSION COMPENSATING FIBER (DCF) PADA LINK SISTEM KOMUNIKASI OPTIK LONG HAUL DENGAN SKEMA BERBEDA

### PERFORMANCE OF DIFFERENT SCHEME DISPERSION COMPENSATING FIBER (DCF) IN LONG HAUL OPTICAL FIBER LINK

Achmad Wildan Almaiz<sup>1</sup>, Akhmad Hambali, Ir.,MT.<sup>2</sup>, Brian Pamukti, S.T., M.T.<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom, Bandung

<sup>1</sup>achmadwildan92@gmail.com, <sup>2</sup>hbl@ittelkom.ac.id, <sup>3</sup>brianpm@gmail.com

#### Abstrak

Dewasa ini dengan bertambahnya kapasitas pengguna internet, *data rate* dengan kapasitas tinggi menjadi suatu kebutuhan, oleh karena itu desain fiber optik komunikasi jarak jauh dengan *bitrate* tinggi diperlukan. Tetapi, *data rate* dengan kapasitas tinggi memiliki kekurangan, dispersi adalah masalah untuk sistem ini. Maka dari itu, dengan menggunakan *dispersion compensating fiber* (DCF) diharapkan dapat mengoptimalkan rancangan fiber optik pada frekuensi tersebut, terutama dari masalah dispersi yang dapat dioptimalkan untuk *receiving-end*. DCF adalah salah satu metode baik yang digunakan untuk menangani masalah dispersi, karena memiliki keunggulan diantaranya *bandwidth* yang lebar, BER yang baik, stabilitas, sensitivitas yang bagus terhadap temperature[2].

Penggunaan DCF pada tugas akhir ini diterapkan pada *Single mode fiber* (SM). Dengan jarak hingga 1000km (long haul) dan *datarate* pada 10 Gbps sebagai pembanding. Skema yang digunakan pada penelitian ini terbagi menjadi 3 bagian, yang pertama yaitu simulasi tanpa DCF, dimana SM dipasang pada jarak longhaul tanpa DCF. Lalu simulasi dengan DCF dimana terdapat 3 skema berbeda yaitu SM dengan DCF, SM dengan DCF yang dirancang secara simetris, dan yang terakhir SM dengan DCF yang dipasang secara paralel, ke tiga skema tersebut didukung dengan penguat *Erbium Doped Fiber Amplifier*(EDFA).

Pada akhir penelitian dengan *bit rate* 10 Gbps, skema tanpa DCF menghasilkan dispersi yang sangat besar dengan nilai *Q factor* maksimal berada pada jarak 100 Km, dengan nilai 8 dan BER bernilai  $4.883 \times 10^{-16}$ . Skema post compensation menghasilkan *Q factor* dengan nilai 6.6 dan BER bernilai  $1.011 \times 10^{-11}$  pada jarak 400 km. Skema pre compensation menghasilkan *Q factor* dengan nilai 7.4 dan BER bernilai  $5.9 \times 10^{-14}$  pada jarak 600 km. Skema mix compensation menghasilkan *Q factor* dengan nilai 6.9 dan BER bernilai  $1.8 \times 10^{-12}$  pada jarak 600 km. Skema paralel compensation menghasilkan *Q factor* dengan nilai 8 dan BER bernilai  $1.16 \times 10^{-6}$  pada jarak 400 km.

**Kata Kunci :** DCF, BER, *Q factor*, EDFA

#### Abstract

Nowadays with the increasing capacity of internet users, high-capacity data rate becomes a necessity, therefore the design of long-distance fiber optic communication with high bitrate is required. However, high-capacity data rates have disadvantages, dispersion is a problem for this system. Therefore, using dispersion compensating fiber (DCF) is expected to optimize the optical fiber design at these frequencies, especially from dispersion problems that can be optimized for receiving-end. DCF is one good method used to handle dispersion problems, because it has advantages such as wide bandwidth, good BER, stability, good sensitivity to temperature.

The use of DCF in this final project is applied to *Single mode fiber* (SM). With distance up to 1000km (long haul) and *datarate* at 10 Gbps as. The scheme used in this study is divided into 4 parts, the first is a simulation without DCF, where SM is installed at long haul distance without DCF. Then simulate with DCF where there are 3 different schemes of BC with DCF, SM with DCF designed symmetrically, and lastly SM with DCF mounted in parallel, the three schemes are supported with *Erbium Doped Fiber Amplifier* (EDFA) amplifier. With *Q factor* parameters and BER as parameter feasibility.

At the end of the study with 10 Gbps bit rate, the scheme without DCF resulted in a very large dispersion with a maximum *Q factor* of 100 km, with a value of 8 and a BER of  $4.883 \times 10^{-16}$ . The post compensation scheme produces a *Q factor* with a value of 6.6 and BER is worth  $1.011 \times 10^{-11}$  at a distance of 400 km. The pre compensation scheme produces a *Q factor* of 7.4 and BER value of  $5.9 \times 10^{-14}$  at a distance of 600 km. The compensation scheme produces a *Q factor* of 6.9 and BER is  $1.8 \times 10^{-12}$  at 600 km. The parallel compensation scheme produces a *Q factor* of 8 and BER Worth  $1.16 \times 10^{-6}$  at a distance of 400 km.

**Key Words:** DCF, BER, *Q factor*, EDFA

## I. PENDAHULUAN

Serat optik merupakan salah satu media transmisi yang populer digunakan saat ini karena banyak sekali keuntungan yang dimilikinya jika dibandingkan dengan media transmisi lain seperti kabel tembaga maupun udara, antara lain potensi *bandwidth* yang sangat besar, ukuran yang kecil, ringan, isolasi dari kelistrikan, ketahanan terhadap interferensi elektromagnetik, rugi-rugi transmisi yang rendah, sifat fisik yang keras namun lentur, kehandalan sistem yang baik, kemudahan perawatan, serta potensi biaya yang rendah. Alasan utama terjadinya dispersi yaitu, dispersi kromatik yang diakibatkan dari ketergantungan terhadap index bias dan *group velocity* pada bahan silica. *Dispersion Compensation Fiber* (DCF) merupakan salah satu cara untuk menangani masalah ini, selain DCF metode yang pernah digunakan diantaranya yaitu dengan *Fiber bragg grating* (FBG) dan *Electronic dispersion compensation*. Masalah dispersi dapat menyebabkan penurunan performansi dengan menurunnya faktor kualitas (Q-factor) dan mengakibatkan banyaknya Bit Error Rate (BER).

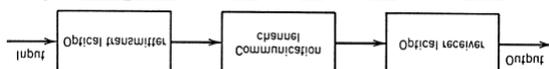
Pada penelitian Mehtab Singh, dengan judul “*Performance Analysis of Different Dispersion Compensation Schemes in a 2.5 Gbps Optical Fiber Communication Link*” [1] dengan menggunakan 3 skema *pre-compensation*, *post-compensation*, dan *symmetrical -compensation* menghasilkan Q factor 19,5 untuk *precompensation*, 41,189 untuk *postcompensation*, 48,109 untuk *symmetrical* pada jarak 250 km dengan 2.5 Gbps data rate.

Pada tugas akhir ini akan menggunakan 3 skema seperti penelitian sebelumnya, masalah pada penelitian sebelumnya adalah bit rate yang digunakan masih cenderung kecil dan jarak yang digunakan juga hanya mencakup 250km. Selain menggunakan 3 skema, penelitian ini akan menambahkan satu skema dengan kompensator secara paralel. Penelitian ini juga akan menggunakan sistem *Dense Width Division Multiplexing* (DWDM). Data rate yang digunakan adalah 10 Gbps sebagai pembanding pengaruh data rate terhadap Q factor, BER terhadap 3 skema tersebut dan jarak akan dibagi berdasarkan kapasitas longhaul.

## II. TEORI

### A. Sistem Komunikasi Optik

Sistem komunikasi serat optik secara umum terdiri dari optical transmitter, kanal komunikasi berupa serat optik, dan optical receiver, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.1. [3]



Gambar 2.1 Sistem komunikasi optik

Optical transmitter bertugas mengubah sinyal elektrik ke sinyal optik dan memasukkannya ke dalam serat optik. Ia terdiri dari sumber optik, modulator, dan

channel coupler. Laser semikonduktor atau light-emitting diodes (LED) biasanya digunakan sebagai sumber optik. Sinyal optik dibangkitkan oleh modulator dengan memvariasikan arus injeksi dari sumber optik. Kemudian sinyal optik yang telah terbentuk difokuskan oleh channel coupler ke dalam serat optik dengan tingkat efisiensi yang sangat tinggi. [8]

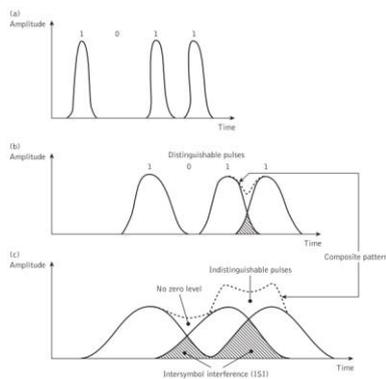
Optical receiver bertugas mengubah sinyal optik yang diterima dari serat optik ke sinyal elektrik seperti semula. Ia terdiri dari coupler, photodetector, dan demodulator. Coupler memfokuskan sinyal optik dari serat optik ke photodetector. Lalu, photodetector mengubahnya ke sinyal elektrik untuk kemudian diterima oleh demodulator. Demodulator ini merupakan sebuah decision circuit yang mengidentifikasi bit sebagai 1 atau 0. Ia tentunya harus menggunakan format modulasi yang sama dengan yang digunakan oleh modulator agar data dapat dihasilkan dengan benar. [8]

### B. Dense Wavelength Division Multiplexing

Hal menarik dari penggunaan cahaya di dalam sistem komunikasi serat optik adalah fakta bahwa semakin tinggi frekuensi dari suatu gelombang pembawa (*carrier*), maka *bandwidth* atau kapasitas transmisinya pun akan semakin besar pula. Hal ini berdasarkan perhitungan dimana *bandwidth* suatu sistem secara teoritis sebesar 10% dari frekuensi gelombang pembawanya. Dengan demikian, suatu sistem komunikasi serat optik dengan panjang-gelombang sebesar 1550 nm, yang merupakan cahaya tak tampak, secara teoritis dapat memiliki *bandwidth* sebesar  $1,93 \times 10^{13}$  Hz (19,3 Thz). teknologi WDM yang merupakan cikal bakal lahirnya DWDM berkembang dari keterbatasan yang ada pada sistem serat optik, dimana pertumbuhan trafik pada sejumlah jaringan *backbone* mengalami percepatan yang tinggi sehingga kapasitas jaringan tersebut dengan cepatnya terisi. Hal ini menjadi dasar pemikiran untuk memanfaatkan jaringan yang ada dibandingkan membangun jaringan baru.

### C. Dispersi

Dispersi dalam komunikasi serat optik adalah proses penyebaran pulsa optik ketika mereka berjalan melewati serat optik. Penyebaran ini terjadi karena kecepatan pulsa optik tidak sama. Ketidaksamaan ini disebabkan oleh indeks bias yang berbeda. Dispersi Modal (Modal Dispersion), hanya terjadi pada kabel jenis fiber multimode. Hal ini diakibatkan perbedaan mode pada transmisi dan mengakibatkan perbedaan waktu penerimaan. Dengan menggunakan graded index hal ini dapat dikurangi. Dispersi total dari sebuah kabel fiber biasanya sudah ditentukan oleh fabrikasi. Biasanya nilai dispersi untuk standart G.652 (tahun 2000) adalah 20 ps/nm.km untuk panjang gelombang 1550 nm dan 3,5 ps/nm.km.



Gambar 1. Dispersi akibat pelebaran pulsa [8]

### D. Dispersion Compensation Fiber (DCF)

Jutaan kilometer conventional single mode fiber dipasang didalam tanah beroperasi pada 1300nm. Salahsatunya bisa digunakan untuk meningkatkan kapasitas transmisi dengan menggunakannya pada operasi 1550nm dan menggunakan teknik WDM dan optik amplifier. Tetapi akan ada banyak dispersi. Pada sisi lain mengganti fiber ini dengan *Dispersion shifted fiber* akan mengakibatkan biaya yang banyak. Oleh karena itu optimisasi pada 1310nm untuk beroperasi pada 1550nm digunakan dengan menggunakan fiber yang memiliki negative dispersion coefficient, yang dapat digunakan untuk mengkompensasi dispersi. Kompensasi dispersi pada panjang gelombang 1550nm yang dioptimisasi dari 1310nm dapat dilakukan dengan mendesign dispersion coefficient (D) yang negatif. Tipe fiber ini dinamakan Dispersion compensating fiber (DCF).

DCF adalah salah satu jenis kompensator yang digunakan untuk menangani masalah dispersi selain *Chirped fiber bragg grating* (FBG) atau Electronic dispersion compensation fiber dalam rangka mencapai sistem yang lebih baik. DCF merupakan kompensator yang memiliki karakteristik lebih bagus diantaranya lebih stabil, tidak mudah terpengaruh oleh suhu, memiliki bandwidth yang lebar, sehingga DCF merupakan kompensator yang paling cocok untuk menjadi kompensator dispersi. Pada serat optik single mode, dispersi yang terjadi adalah dispersi positif, sedangkan DCF memiliki dispersi negatif, sehingga hasil dispersi rata-rata mendekati nol.

DCF memiliki dispersi negatif yang tinggi sekitar -70 sampai -90 ps/km.nm dan dapat digunakan di serat optik yang memiliki dispersi positif dengan daerah transmisi di daerah C-Band (1520 - 1625 nm) [5].

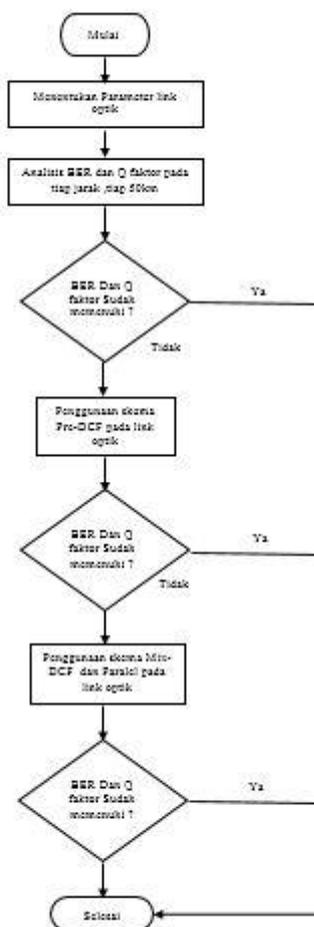
## III. PERANCANGAN

Pada perancangan konfigurasi skema penelitian ini, hal yang harus ditentukan terlebih dahulu adalah menentukan parameter dasar pada link optik seperti panjang gelombang, jenis serat optik, jarak, jenis filter, redaman kabel, modulasi, modulator. Selanjutnya analisis pada optisistem untuk mengukur apakah

parameter tersebut memenuhi Q faktor dan BER dimana dalam sistem komunikasi optik standar yang baik yaitu Q faktor  $> 6$  dan BER  $10^{-9}$ . Jika pada prakteknya ternyata tidak memenuhi parameter tersebut maka masuk kedalam skema Precompensator, yaitu menambahkan kompensator DCF sebelum SMF. Hasil ini akan dilakukan perbandingan terhadap skema Postcompensator, yaitu menambahkan kompensator setelah SMF, Mix compensator yaitu gabungan antara post dan precompensator, sedangkan untuk paralel compensator akan dilakukan dengan tambahan *power splitter* dengan rangkaian mix DCF yang dipasang secara paralel

### A. Tahap Perancangan

Langkah-langkah penelitian adalah sebagai berikut:



Gambar 3.1 Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir

Gambar 3. Diagram Blok Perancangan Tugas Akhir

### B. Model Perancangan

Jenis fiber optik yang digunakan adalah single mode fiber SMF-8e Shifted Zero sesuai dengan standard ITU-T-REC-G.652-2016 bekerja pada gelombang 1330 nm atau 1550nm, baik analog maupun digital transmisi dapat digunakan pada fiber ini. Berdasarkan standard maka dalam penelitian ini menggunakan laju bit 10

**Tabel 3.1** Spesifikasi Fiber

Jenis Kabel	Parameter	Nilai
Single mode Fiber E28	Attenuation 1550nm	0.19-0.2 dB/km
	Attenuation 1625 nm	0.2-0.23 dB/km
	Macrobend Loss 1550 nm	≤0.05 dB
	Dispersi 1550nm kromatik	≤ 6 ps nm/km
	λmin	1550nm
	λmax	1625nm
	Dispersion slope	0.086 ps nm/km
Penguat EDFA	Gain	22 dB
Redaman	Redaman Splicing	0.1 dB/buah
	Redaman Konektor	0.2 dB/buah
DCF	Dispersi 1550nm kromatik	-49 to -30 ps nm/km
	Dispersion slope	-0.155 to -0.075 ps nm/km
	Attenuation	≤ 0.265 nm
	Cladding diameter	125 μm
	Coating Diameter	250 μm
	MFD	5.72 μm
DWDM	Optical return loss	≥ 60 dB
	Spasi kanal	0.8 (100ghz grid)

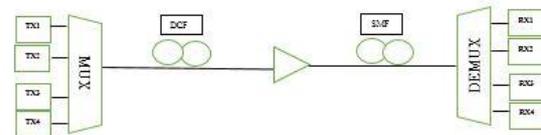
Setelah ditentukan spesifikasi kabel kemudian dilakukan perhitungan dimensi jarak DCF untuk tiap jarak

$$\text{Total Dispersi kromatik} = D_c \times \sigma\lambda \times L$$

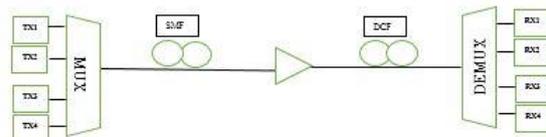
$$0 = D_c \times \sigma\lambda \times L$$

Jarak(km)	Panjang DCF (km)
100	12.2
200	24.4
300	36.7
400	48.9
500	61.2
600	73.4
700	85.7
800	97.9
900	110
1000	122

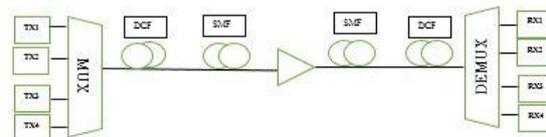
C. Skema Pengujian



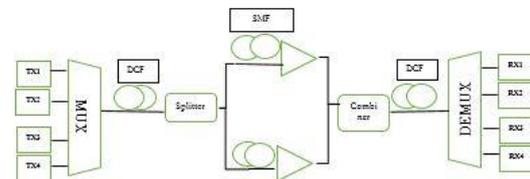
Gambar 3.2 Post Compensation



Gambar 3.3 Pre Compensation



Gambar 3.4 Mix Compensation



Gambar 3.6 Paralel Compensation

Skema Post Compensation, dengan panjang DCF pada point C, dengan meletakkan kabel DCF sebelum multiplexing, Skema Pre compensation merupakan skema dengan meletakkan kabel DCF setelah multiplexing. Skema Mix compensation merupakan gabungan dari dua skema sebelumnya dan skema paralel ditambah bantuan *power splitter* dan *power combiner* dengan panjang kabel SMF yang sama dipasang secara paralel.

D. Hasil Simulasi

Tabel 3.2 Performansi link Skenario tanpa DCF

Jarak	Q Factor	BER
100	8	4.883 e <sup>-016</sup>
200	5	2.5 e <sup>-07</sup>
300	2.5	0.006343
400	2.8	0.001844
500	2.6	0.003613

600	2.4	0.008434
700	2.5	0.005923
800	2.3	0.00764
900	2.5	0.00512

Tabel 3.3 Performansi Link Post DCF

Jarak	Q factor	BER
100	9.3	$4.583 \times 10^{-21}$
200	7.9	$9.3 \times 10^{-16}$
300	7.8	$1.52 \times 10^{-15}$
400	6.6	$1.011 \times 10^{-11}$
500	5.3	$3.6 \times 10^{-8}$
600	4.5	$2.1 \times 10^{-6}$
700	5	$1.9 \times 10^{-7}$
800	3	0.0011
900	3.1	0.00068
1000	3.1	0.00043

800	4.7	$4.8 \times 10^{-7}$
900	4.1	$1.7 \times 10^{-5}$
1000	3.2	$4.7 \times 10^{-5}$

Tabel 3.3 Performansi Link Paralel DCF

Jarak	Q factor	BER
100	9.2	$7.23 \times 10^{-20}$
200	9.1	$1.17 \times 10^{-19}$
300	8.1	$9.3 \times 10^{-16}$
400	6.2	$1.011 \times 10^{-11}$
500	4.6	$2.1 \times 10^{-6}$
600	3.2	0.0068
700	2.3	$2.80 \times 10^{-3}$
800	2.3	0.00021
900	2.6	0.0036
1000	0	1

Tabel 3.3 Performansi Link Pre DCF

Jarak	Q Factor	BER
100	13.4	$6.9 \times 10^{-42}$
200	12.45	$5.9 \times 10^{-36}$
300	12.1	$5.4 \times 10^{-34}$
400	11.1	$3.0 \times 10^{-29}$
500	9.8	$4.9 \times 10^{-23}$
600	8.5	$5.0 \times 10^{-18}$
700	7.4	$5.9 \times 10^{-14}$
800	5.4	$5.4 \times 10^{-9}$
900	4.3	$4.4 \times 10^{-6}$
1000	3.2	0.00058

Tabel 3.3 Performansi Link Mix DCF

Jarak	Q factor	BER
100	10.3	$3.3 \times 10^{-25}$
200	9.4	$2.06 \times 10^{-21}$
300	9.5	$5.7 \times 10^{-22}$
400	7.8	$2.3 \times 10^{-15}$
500	7.2	$1.9 \times 10^{-13}$
600	6.9	$1.8 \times 10^{-12}$
700	5.3	$4.6 \times 10^{-8}$

#### IV. PENGUKURAN DAN ANALISIS

Dengan bit rate 10 Gbps tanpa menggunakan kompensator DCF, dispersi yang dihasilkan sangat besar nilai BER paling tinggi berada pada hanya jarak 100 Km saja yaitu  $4.883 \times 10^{-16}$  dengan Q factor 8. Sedangkan setelah simulasi memasuki jarak yang lebih jauh, yaitu 200km nilai BER terukur  $2.5 \times 10^{-7}$  yang berarti tidak memenuhi standard kualitas link optik, hasil pengukuran semakin buruk dan tetap tidak memenuhi nilai standard link optik yaitu  $10 \times 10^{-9}$

Skema Post Compensation DCF, mampu menangani dispersi hanya sampai jarak 400, jarak 500 Km mengakibatkan dispersi yang cukup besar terhadap performansi link. Nilai BER yang memenuhi standard berada pada maksimal jarak 400km yaitu  $1.011 \times 10^{-11}$  dengan Q factor 6.6. Sedangkan setelah simulasi memasuki jarak yang lebih jauh, yaitu 500 km nilai BER maksimal pada kanal terukur  $3.6 \times 10^{-8}$  yang berarti tidak memenuhi standard kualitas link optik

Skema Pre tcompensation, mampu menangani dispersi hingga jarak 700 Km. Nilai BER yang memenuhi standard berada pada maksimal jarak 700 Km yaitu  $5.9 \times 10^{-14}$  dengan Q factor 7.4. Sedangkan setelah simulasi memasuki jarak yang lebih jauh yaitu 800 km nilai BER maksimal pada kanal terukur  $5.4 \times 10^{-9}$  yang berarti tidak memenuhi standard kualitas link optik.

Skema mix compensation, mampu menagnani dispersi hingga jarak 600 Km mengakibatkan dispersi

yang cukup besar terhadap performansi link. Nilai BER yang memenuhi standard berada pada maksimal jarak 600 Km yaitu  $1.8 \times 10^{-12}$  dengan Q factor 6.9. Sedangkan setelah simulasi memasuki jarak yang lebih jauh yaitu 700 km nilai BER maksimal pada kanal terukur  $4.6 \times 10^{-8}$  yang berarti tidak memenuhi standard kualitas link optik.

Skema Paralel compensation, dapat diambil kesimpulan pada *bit rate* 10 Gbps jarak 400 km mengakibatkan dispersi yang besar terhadap performansi link. Dari data diatas dapat dilihat bahwa nilai BER yang memenuhi standard berada pada maksimal jarak 400km yaitu  $1.011 \times 10^{-11}$  dengan Q factor 6.2. Hal ini diakibatkan terjadinya pembagian arus oleh splitter yang justru menyebabkan total dispersi pada sisi penerima semakin banyak sehingga tidak dapat menghasilkan performansi yang lebih baik

## V. KESIMPULAN DAN SARAN

### A. Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari seluruh proses simulasi dan analisis skema DCF, adalah sebagai berikut:

1. Tujuan utama pembuatan Tugas Akhir ini tercapai yaitu mendapatkan skema dengan performansi link optik yang bagus untuk jarak long haul, meskipun tidak dapat mengkompensasi hingga 1000 Km, tetapi jarak 700 Km sudah merupakan pencapaian yang cukup baik. Skema Pre Compensation memiliki performa terbaik.
2. Jarak berpengaruh terhadap performansi link optik dimana semakin jauh mengakibatkan dispersi yang semakin besar.

### B. Saran

Untuk mendapatkan performansi link yang lebih baik pada simulasi berikutnya, terdapat beberapa hal yang bisa dijadikan saran dan sebagai bahan pertimbangan antara lain,

1. Melakukan Optimasi dengan skema yang lebih sederhana untuk mendapatkan nilai Q factor > 6 dan BER  $10^{-9}$
2. Menggunakan parameter acuan yang berbeda baik spesifikasi fiber, skema maupun bit rate dan jarak

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Singh, Mehtab. "Performance Analysis of Different Dispersion Compensation Schemes in a 2.5 Gbps Optical Fiber Communication Link". Thesis University Of Twente, International Journal of Technology Enhancement vol3, Issue 08 2015.
- [2] Kaur, Manpreet, Sarangal, Himali. "Dispersion Compensation with Dispersion compensating Fibers (DCF)". International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering vol.4, Issue 2, February 2015
- [3] Singh, Robin, Kumar, Love, Malhotra, Neeru. "Dispersion Compensation in Optical Fiber communication for 40 Gbps using dispersion compensating Fiber". International journal for science and emerging technologies with latest Trend 19(1) : 19-22(2015).
- [4] R.S.Kaler, Ajay, TS Kamal "Comparison of pre-post and symmetrical dispersion compensation schemes for 10Gbps NRZ links using standard and dispersion compensated fiber", Elsevier Optics Communication 209 2002
- [5] L.N. Binh, K-Y Chin and D. Sharma, "Design of dispersion flattened and compensating ...", *Int. J. Scientific and Engineering Research*, vol. 5, issue 5, May 2012.
- [6] Bruckner, Volkmar ". *Element of optical network basic and practice*, (2011)
- [7] Govind P. Agrawal, *Applications of Nonlinear Fiber Optics*. Academic Press, 2001.
- [8] Govind P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*, 3rd ed. John Wiley & Sons, Inc, 2002.
- [9] ITUT Standard T-REC-G.652-2016, T-REC-G.655, T-REC-G.973.2