

repository.ub.ac.id

**ANALISIS PERFORMANSI *SINGLE CARRIER FREQUENCY
DIVISION MULTIPLE ACCESS (SC-FDMA)* PADA TEKNOLOGI
*RADIO OVER FIBER (ROF)***

**SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK TELEKOMUNIKASI**

*Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik*



Disusun oleh :
Y. REZA ANGGA SUKMA
NIM: 0810630104-63

**KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG
2013**

LEMBAR PERSETUJUAN

ANALISIS PERFORMANSI *SINGLE CARRIER FREQUENCY DIVISION MULTIPLE ACCESS (SC-FDMA)* PADA TEKNOLOGI *RADIO OVER FIBER (RoF)*

SKRIPSI KONSENTRASI TEKNIK TELEKOMUNIKASI

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar sarjana teknik



Disusun Oleh :

Y. REZA ANGGA SUKMA
NIM: 0810630104 - 63

Telah diperiksa dan disetujui oleh

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Ir. Erfan Achmad Dahlan, MT.
NIP. 19530714 198203 1 003

Dr-Ing. Onny Setyawati, ST., MT., M.Sc.
NIP. 19740417 200003 2 007

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS PERFORMANSI *SINGLE CARRIER DIVISION MULTIPLE ACCESS (SC-FDMA)* PADA TEKNOLOGI *RADIO OVER FIBER (ROF)*

Disusun Oleh :

Y. REZA ANGGA SUKMA
NIM. 0810630104 - 63

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus
pada tanggal **15 Juli 2013**

Majelis Penguji :

Dwi Fadila K., ST., MT
NIP. 19720630 200003 1 002

Dr. Ir. Sholeh Hadi Pramono, MS
NIP. 19580728 198701 1 001

Ir. Wahyu Adi P., MS
NIP. 19600518 198 802 1 001

Mengetahui :
Ketua Jurusan Teknik Elektro

Dr. Ir. Sholeh Hadi Pramono, MS
NIP. 19580728 198701 1 001

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur kepada Allah Bapa di surga beserta Putra-Nya yang Tunggal Yesus Kristus atas segala berkat dan penyertaan yang telah diberikan kepada penulis sehingga penulisan skripsi dengan judul “Analisis Performansi *Single Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA)* pada Teknologi *Radio over Fiber (RoF)*” dapat diselesaikan dengan sebaik-baiknya. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Elektro, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang.

Penulisan skripsi ini tidak akan dapat berjalan dengan lancar tanpa doa, dorongan, bantuan serta bimbingan dari beberapa pihak yang telah mau meluangkan waktu untuk berkerja sama. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan rasa hormat dan terima kasih kepada:

1. Keluarga besar ST. Yulianto; Ibu, Papa, Mbak Ika beserta keluarga, dan kerabat dekat lain atas doa, perhatian, dan dukungannya.
2. Bapak Dr. Ir. Sholeh Hadi Pramono, MS selaku Ketua Jurusan Elektro dan Bapak dan Muhammad Aziz Muslim, ST., MT., PhD selaku Sekretaris Jurusan Elektro.
3. Bapak Ali Mustofa, ST., MT selaku Ketua Kelompok Dosen Keahlian Telekomunikasi Jurusan Elektro.
4. Bapak Ir. Erfan Achmad Dahlan, MT. dan Ibu Dr-Ing. Onny Setyawati, ST., MT., M.Sc. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan pengarahan dan bimbingan selama pengerjaan skripsi.
5. Bapak Ibu Dosen serta seluruh staf dan karyawan Jurusan Elektro.
6. Sahabat dekat selama di perkuliahan khususnya Amalia Eka atas kesabaran dan waktu luang yang telah diberikan serta Wakhida, Angga, Deby, Pram, Ceri, Jodi, Alvita, Katerin, Mbak Siska, Mas Hendri, Dista, Jumi, Pepi atas segala doa, bantuan, bimbingan dan keceriaan selama menjalani masa studi di kampus.
7. Teman-teman Concordes dan paket C'08 atas kenangan dan perjuangan bersama yang tidak akan dilupakan seumur hidup.

8. Teman-teman *Home Band* Teknik Mas Angga, Mbak Dee, Jodi, Tian, Yeremia, Ista, Moi, Angga, Raka, Rindu dan Limbong. Terimakasih atas doa, perhatian, dan dukungannya.
9. Rekan dan sahabat lain yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.

Dalam penulisan skripsi ini, penulis menyadari adanya kekurangan dan ketidak sempurnaan. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun untuk kelengkapan dan kesempurnaan skripsi ini. Penulis berharap semoga skripsi ini dapat bermanfaat khususnya bagi rekan-rekan mahasiswa.

Malang, Juni 2013

Penulis



DAFTAR ISI

	halaman
KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR GAMBAR	v
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR LAMPIRAN	xi
ABSTRAK	xii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Ruang Lingkup.....	3
1.4 Tujuan.....	4
1.5 Sistematika Penulisan.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 <i>Long Term Evolution</i> (LTE).....	5
2.1.1 Arsitektur LTE	6
2.1.2 Spesifikasi Teknis LTE	7
2.2 <i>Single Carrier Division Multiple Access</i> (SC-FDMA).....	8
2.2.1 Pembagian Aliran Data pada SC-FDMA.....	11
2.2.2 Modulasi Adaptif.....	12
2.2.3 Kanal Propagasi.....	16
2.2.4 Kanal AWGN pada Sistem SC-FDMA.....	16
2.2.5 SC-FDMA <i>Signal Processing</i>	17
2.2.6 Konversi Srial ke Paralel (S/P).....	19
2.2.7 <i>Guard Interval</i> dan <i>Cyclic Prefix</i> (CP)	19
2.3 <i>Radio over Fiber</i> (RoF)	21
2.3.1 Pengenalan RoF	22
2.3.2 Arsitektur RoF.....	25



2.4	Performansi Sistem SC-FDMA pada Teknologi RoF	30
2.4.1	Laju Data/ <i>Peak bit rate</i>	30
2.4.2	Rugi-rugi propagasi <i>Non-line of Sight</i> (NLOS)	30
2.4.3	<i>Signal Noise to Ratio</i> (SNR)	33
2.4.4	Kapasitas kanal sistem	34
2.4.5	<i>Bit rate</i>	35
2.4.6	<i>Bit Error Rate</i> (BER)	35
BAB III METODOLOGI.....		37
3.1	Studi literatur.....	37
3.2	Pengambilan data	37
3.3	Penghitungan dan analisis data	38
3.4	Pengambilan kesimpulan dan saran	43
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....		44
4.1	Menghitung <i>bandwidth</i> sistem SC-FDMA pada kanal 10 Mhz sisi <i>uplink</i> LTE dengan CP yang berbeda.....	47
4.2	Analisis SNR Teknologi RoF pada Sistem SC-FDMA	52
4.3	Analisis Kapasitas Kanal saluran serat optik Teknologi RoF pada sistem SC-FDMA	67
4.4	Analisis <i>Bit rate</i> saluran serat optik Teknologi RoF pada sistem SC-FDMA	75
4.5	Analisis BER Teknologi RoF pada sistem SC-FDMA	78
BAB V PENUTUP.....		93
5.1	Kesimpulan.....	93
5.2	Saran.....	95
DAFTAR PUSTAKA		96
LAMPIRAN.....		98

DAFTAR GAMBAR

	halaman
Gambar 2.1 Struktur <i>Frame</i> LTE.....	5
Gambar 2.2 Skema <i>Multiple Access</i> LTE	6
Gambar 2.3 Blok Diagram Transmisi Simbol SC-FDMA.....	9
Gambar 2.4 Perbandingan Transmisi Simbol Data QPSK pada Teknologi OFDMA dan SC-FDMA.....	10
Gambar 2.5 Pembagian Aliran Data SC-FDMA.....	11
Gambar 2.6 Penggunaan Modulasi Adaptif Pada Kondisi <i>Link</i> Radio yang berbeda	12
Gambar 2.7 Diagram Kosntelasi Modulasi QPSK.....	13
Gambar 2.8a QPSK <i>Modulator</i>	13
Gambar 2.8b QPSK <i>Demodulator</i>	13
Gambar 2.9 Sinyal Pada <i>Quadrature Phase Shift Keying</i> (QPSK).....	14
Gambar 2.10 Diagram Konstelasi 16-QAM.....	15
Gambar 2.11 Diagram Konstelasi 64-QAM.....	15
Gambar 2.12 QAM <i>Modulator</i>	16
Gambar 2.13 QAM <i>Demodulator</i>	16
Gambar 2.14 Diagram blok sistem SC-FDMA	18
Gambar 2.15 Struktur <i>Receiver</i> SC-FDMA dengan Terminal-Q sisi <i>Uplink</i> . ..	18
Gambar 2.16 Skema penggunaan CP untuk menghindari terjadinya <i>Inter-Symbol Interference</i> (ISI)	20
Gambar 2.17 <i>Short and Extended Cyclic Prefix</i> (CP)	21

Gambar 2.18	Konsep RoF.....	23
Gambar 2.19	Sistem <i>Fiber-Radio</i>	23
Gambar 2.20	Arsitektur RoF.....	25
Gambar 3.1	Diagram Alir Perhitungan SNR Sistem.....	40
Gambar 3.2	Diagram Alir Perhitungan Kapasitas Kanal SC-FDMA	41
Gambar 3.3	Diagram Alir Perhitungan <i>bit rate</i> Sistem.....	42
Gambar 3.4	Diagram Alir Perhitungan BER.....	43
Gambar 4.1	Pemodelan Sistem (<i>Uplink</i>).....	45
Gambar 4.2	Blok Diagram <i>Losses</i> , Penguatan serta Penambahan <i>Noise</i> pada RoF	52
Gambar 4.3	Grafik Hubungan Antara Panjang Serat Optik dengan SNR_{sistem} pada Teknik Modulasi QPSK dengan $CP = 0,0729$	62
Gambar 4.4	Grafik Hubungan Antara Panjang Serat Optik dengan SNR_{sistem} pada Teknik Modulasi QPSK dengan $CP = 0,2$	62
Gambar 4.5	Grafik Hubungan Antara Panjang Serat Optik dengan SNR_{sistem} pada Teknik Modulasi 16-QAM dengan $CP = 0,0729$	64
Gambar 4.6	Grafik Hubungan Antara Panjang Serat Optik dengan SNR_{sistem} pada Teknik Modulasi 16-QAM dengan $CP = 0,2$	64
Gambar 4.7	Grafik Hubungan Antara Panjang Serat Optik dengan SNR_{sistem} pada Teknik Modulasi 64-QAM dengan $CP = 0,0729$	66
Gambar 4.8	Grafik Hubungan Antara Panjang Serat Optik dengan SNR_{sistem} pada Teknik Modulasi 64-QAM dengan $CP = 0,2$	66
Gambar 4.9	Grafik Hubungan Antara Panjang Serat Optik dengan Kapasitas Kanal pada Teknik Modulasi QPSK dengan $CP = 0,0729$	70
Gambar 4.10	Grafik Hubungan Antara Panjang Serat Optik dengan Kapasitas Kanal pada Teknik Modulasi QPSK dengan $CP = 0,2$	70
Gambar 4.11	Grafik Hubungan Antara Panjang Serat Optik dengan Kapasitas Kanal pada Teknik Modulasi 16-QAM dengan $CP = 0,0729$...	72
Gambar 4.12	Grafik Hubungan Antara Panjang Serat Optik dengan Kapasitas Kanal pada Teknik Modulasi 16-QAM dengan $CP = 0,2$	72

Gambar 4.13	Grafik Hubungan Antara Panjang Serat Optik dengan Kapasitas Kanal pada Teknik Modulasi 64-QAM dengan $CP = 0,0729...$	74
Gambar 4.14	Grafik Hubungan Antara Panjang Serat Optik dengan Kapasitas Kanal pada Teknik Modulasi 64-QAM dengan $CP = 0,2.....$	74
Gambar 4.15	Grafik Hubungan Antara Panjang Serat Optik dengan <i>Bit rate</i> sistem.....	77
Gambar 4.16	Grafik Hubungan Antara Panjang Serat Optik dengan BER pada Teknik Modulasi QPSK dengan $CP = 0,0729.....$	79
Gambar 4.17a	Grafik Hubungan Antara Panjang Serat Optik dengan BER pada Teknik Modulasi QPSK dengan $CP = 0,0729, \lambda = 1310 \text{ nm} ...$	79
Gambar 4.17b	Grafik Hubungan Antara Panjang Serat Optik dengan BER pada Teknik Modulasi QPSK dengan $CP = 0,0729, \lambda = 1490 \text{ nm} ...$	79
Gambar 4.17c	Grafik Hubungan Antara Panjang Serat Optik dengan BER pada Teknik Modulasi QPSK dengan $CP = 0,0729, \lambda = 1550 \text{ nm} ...$	80
Gambar 4.18	Grafik Hubungan Antara Panjang Serat Optik dengan BER pada Teknik Modulasi QPSK dengan $CP = 0,2.....$	80
Gambar 4.19a	Grafik Hubungan Antara Panjang Serat Optik dengan BER pada Teknik Modulasi QPSK dengan $CP = 0,2, \lambda = 1310 \text{ nm}$	81
Gambar 4.19b	Grafik Hubungan Antara Panjang Serat Optik dengan BER pada Teknik Modulasi QPSK dengan $CP = 0,2, \lambda = 1490 \text{ nm}$	81
Gambar 4.19c	Grafik Hubungan Antara Panjang Serat Optik dengan BER pada Teknik Modulasi QPSK dengan $CP = 0,2, \lambda = 1550 \text{ nm}$	81
Gambar 4.20	Grafik Hubungan Antara Panjang Serat Optik dengan BER pada Teknik Modulasi 16-QAM dengan $CP = 0,0729$	83
Gambar 4.21a	Grafik Hubungan Antara Panjang Serat Optik dengan BER pada Teknik Modulasi 16-QAM dengan $CP = 0,0729, \lambda = 1310 \text{ nm}$	84
Gambar 4.21b	Grafik Hubungan Antara Panjang Serat Optik dengan BER pada Teknik Modulasi 16-QAM dengan $CP = 0,0729, \lambda = 1490 \text{ nm}$	84
Gambar 4.21c	Grafik Hubungan Antara Panjang Serat Optik dengan BER pada Teknik Modulasi 16-QAM dengan $CP = 0,0729, \lambda = 1550 \text{ nm}$	84

Gambar 4.22	Grafik Hubungan Antara Panjang Serat Optik dengan BER pada Teknik Modulasi 16-QAM dengan CP = 0,2	85
Gambar 4.23a	Grafik Hubungan Antara Panjang Serat Optik dengan BER pada Teknik Modulasi 16-QAM dengan CP = 0,2, $\lambda = 1310$ nm.....	85
Gambar 4.23b	Grafik Hubungan Antara Panjang Serat Optik dengan BER pada Teknik Modulasi 16-QAM dengan CP = 0,2, $\lambda = 1490$ nm.....	85
Gambar 4.23c	Grafik Hubungan Antara Panjang Serat Optik dengan BER pada Teknik Modulasi 16-QAM dengan CP = 0,2, $\lambda = 1550$ nm.....	86
Gambar 4.24	Grafik Hubungan Antara Panjang Serat Optik dengan BER pada Teknik Modulasi 64-QAM dengan CP = 0,0729	87
Gambar 4.25a	Grafik Hubungan Antara Panjang Serat Optik dengan BER pada Teknik Modulasi 64-QAM dengan CP = 0,0729, $\lambda = 1310$ nm	88
Gambar 4.25b	Grafik Hubungan Antara Panjang Serat Optik dengan BER pada Teknik Modulasi 64-QAM dengan CP = 0,0729, $\lambda = 1490$ nm	88
Gambar 4.25c	Grafik Hubungan Antara Panjang Serat Optik dengan BER pada Teknik Modulasi 64-QAM dengan CP = 0,0729, $\lambda = 1550$ nm	88
Gambar 4.26	Grafik Hubungan Antara Panjang Serat Optik dengan BER pada Teknik Modulasi 64-QAM dengan CP = 0,2	89
Gambar 4.27a	Grafik Hubungan Antara Panjang Serat Optik dengan BER pada Teknik Modulasi 64-QAM dengan CP = 0,2, $\lambda = 1310$ nm.....	90
Gambar 4.27b	Grafik Hubungan Antara Panjang Serat Optik dengan BER pada Teknik Modulasi 64-QAM dengan CP = 0,2, $\lambda = 1490$ nm.....	90
Gambar 4.27c	Grafik Hubungan Antara Panjang Serat Optik dengan BER pada Teknik Modulasi 64-QAM dengan CP = 0,2, $\lambda = 1550$ nm.....	90



UNIVERSITAS BRAWIJAYA

DAFTAR TABEL

		halaman
Tabel 2.1	Spesifikasi Teknis LTE	8
Tabel 2.2	Parameter untuk Tipe <i>Terrain</i> yang berbeda.....	32
Tabel 4.1	Spesifikasi LTE untuk Model Propagasi Okomura-Hata.....	44
Tabel 4.2	Karakteristik LTE pada Kanal <i>Bandwidth</i> 10 Mhz.....	46
Tabel 4.3	<i>Peak bit rate</i> dengan kanal <i>Bandwidth</i> 10 Mhz.....	48
Tabel 4.4	<i>Peak bit rate</i> pada tiap <i>subcarrier</i> dengan kanal <i>Bandwidth</i> 10 Mhz	49
Tabel 4.5	Durasi simbol pada tiap <i>subcarrier</i> dengan kanal <i>Bandwidth</i> 10 Mhz	50

Tabel 4.6	Durasi <i>subcarrier</i> dengan kanal <i>Bandwidth</i> 10 Mhz	50
Tabel 4.7	<i>Bandwidth</i> pada tiap <i>subcarrier</i> dengan kanal 10 Mhz	51
Tabel 4.8	<i>Bandwidth</i> sistem pada kanal <i>Bandwidth</i> 10 Mhz	52
Tabel 4.9	Spesifikasi Teknologi RoF.....	54
Tabel 4.10	LTE <i>Operating Range (Sub-Urban)</i>	55
Tabel 4.11	Hasil analisis Rugi-rugi Propagasi NLOS	56
Tabel 4.12	Noise AWGN pada kanal <i>bandwidth</i> 10 Mhz.....	57
Tabel 4.13	Shot noise pada kanal <i>bandwidth</i> 10 Mhz.....	58
Tabel 4.14	Thermal noise pada kanal <i>bandwidth</i> 10 Mhz	58
Tabel 4.15	RIN pada kanal <i>bandwidth</i> 10 Mhz.....	59
Tabel 4.16	Total noise pada kanal <i>bandwidth</i> 10 Mhz	60
Tabel 4.17	Hasil Analisis SNR _{sistem} pada Teknik Modulasi QPSK	61
Tabel 4.18	Hasil Analisis SNR _{sistem} pada Teknik Modulasi 16-QAM.....	63
Tabel 4.19	Hasil Analisis SNR _{sistem} pada Teknik Modulasi 64-QAM.....	65
Tabel 4.20	Hasil Analisis <i>Bandwidth</i> kanal Optik.....	68
Tabel 4.21	Hasil Analisis Kapasitas kanal pada Teknik Modulasi QPSK...	69
Tabel 4.22	Hasil Analisis Kapasitas kanal pada Teknik Modulasi 16-QAM	71
Tabel 4.23	Hasil Analisis Kapasitas kanal pada Teknik Modulasi 64-QAM	73
Tabel 4.24	Hasil Analisis <i>bit rate</i>	76
Tabel 4.25	Hasil Analisa BER pada Sistem QPSK	78
Tabel 4.26	Hasil Analisa BER pada Sistem 16-QAM	83
Tabel 4.27	Hasil Analisa BER pada Sistem 64-QAM	87

DAFTAR LAMPIRAN

		halaman
Lampiran 1	Listing program Matlab untuk menghitung SNR sistem dan menampilkan grafiknya	98
Lampiran 2	Listing program Matlab untuk menghitung Nilai Kapasitas Kanal dan menampilkan grafiknya	100
Lampiran 3	Listing program Matlab untuk menghitung <i>Bit rate</i> dan menampilkan grafiknya	102

Lampiran 4 Listing program Matlab untuk menghitung nilai BER sistem dan menampilkan grafiknya..... 103

Lampiran 5 Spesifikasi serat optik Corning Comp..... 105



ABSTRAK

Y. REZA ANGGA SUKMA, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Juli 2013, *Analisis Performansi Single Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA) pada Teknologi Radio over Fiber (RoF)*, Dosen Pembimbing: **Ir. Erfan Achmad Dahlan Budi, MT.** dan **Dr-Ing. Onny Setyawati, ST., MT., M.Sc.**

Radio over Fiber (RoF) adalah teknologi penggabungan antara sistem kabel dan nirkabel, dimana sisi nirkabel terletak pada pangiriman sinyal radio dari *base station*, sedangkan kabel terletak pada pengirimannya melalui serat optik. Skripsi ini membahas performansi dari pengaplikasian *Single Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA)* pada teknologi RoF pada jaringan *mobile Long Term Evolution (LTE)* di sisi *uplink*.

Performansi yang diamati pada penelitian ini adalah *signal to noise ratio (SNR)*, kapasitas kanal, *bit rate* dan *bit error rate (BER)* dengan berdasarkan perubahan variabel bebas yang yaitu perubahan teknik modulasi, perubahan panjang gelombang, perubahan panjang serat optik atau jarak transmisi dan perubahan jenis *cyclic prefix (CP)* yang digunakan.

Dari hasil perhitungan dapat diketahui bahwa panjang serat optik berbanding terbalik dengan nilai SNR sistem, kapasitas kanal dan *bit rate* tetapi berbanding terbalik dengan nilai BER sistem. Panjang gelombang 1550nm lebih baik dibandingkan panjang gelombang 1490nm dan 1310nm dalam perhitungan SNR sistem, kapasitas kanal dan BER tetapi panjang gelombang 1310nm lebih unggul dalam perhitungan *bit rate* dari λ 1550nm dan 1490nm. Penggunaan CP 0,2 lebih baik daripada CP 0,0729 dalam perhitungan SNR sistem dan kapasitas kanal, tetapi dalam perhitungan BER sistem CP 0,0729 sedikit lebih baik. Teknik modulasi 64-QAM memiliki nilai terbaik baik dalam perhitungan SNR sistem, kapasitas kanal maupun BER sistem dibandingkan teknik modulasi 16-QAM atau QPSK.

Kata Kunci: SC-FDMA, RoF, performansi, SNR, Kapasitas kanal, *bit rate*, BER.

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Telekomunikasi saat ini menjadi salah satu topik yang tidak habis dibicarakan dan diulas perkembangannya, hal ini terjadi karena kemajuan teknologinya yang begitu pesat dibandingkan dengan isu teknologi lainnya. Permintaan publik yang semakin hari semakin menuntut lebih, baik dari segi kualitas dan kuantitas. Salah satu bagian yang harus diakui paling cepat kemajuannya adalah *mobile telecommunication* atau nirkabel. Dimulai dari 1G, 2G, 3G dan yang terbaru saat ini 4G yaitu *Long Term Evolution* (LTE) akan semakin memenuhi keinginan para penggunanya dalam memperoleh layanan yang semakin bervariasi dan kecepatan data yang tinggi. Layanan tersebut merupakan integrasi dari suara, data, gambar, dan *video*.

LTE dalam sistem pentransmisiannya menggunakan dua jenis teknik *multiple access* yaitu *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA) pada *downlink* dan *Single-Carrier Frequency-Division Multiple Access* (SC-FDMA) pada *uplink*nya. OFDMA merupakan teknik *multiple access* dengan banyak frekuensi (*multicarrier*). Dengan menggunakan teknologi OFDMA maka setiap bit data akan dimodulasikan pada sebuah *subset subcarrier*. Teknik *muticarrier* OFDMA untuk mengakomodasi *multiple user* secara simultan. Namun sisi lain juga terdapat teknik komunikasi yang digunakan pada teknologi IEEE 802.16e yaitu *Single-Carrier Frequency-Division Multiple Access* (SC-FDMA) **adalah suatu teknik *multiple access* yang menggunakan *multicarrier* yang saling tegak lurus (*orthogonal*)**

Sistem *radio over fiber* (RoF) merupakan penggabungan antara sistem kabel dan nirkabel, di mana sisi nirkabel terletak pada pengiriman sinyal radio dari *base station*, sedangkan kabel pada pengirimannya melalui serat optik. Hal ini dilakukan untuk menjangkau lokasi di luar daerah cakupan *base station*, sehingga tidak perlu dilakukan pembangunan *base station* baru. Teknologi RoF mendapat banyak perhatian karena

banyaknya permintaan kapasitas maupun daerah cakupan dan keuntungan sistem ini dalam pengembangan *base station* yang berbiaya murah pada sistem *macrocellular*. Pada dasarnya RoF merupakan transmisi analog, karena mendistribusikan gelombang radio secara langsung pada frekuensi karier radio dari sentral menuju *radio access point* (RAP) atau disebut juga *radio access unit* (RAU). Walaupun sistem transmisinya analog, tetapi sistem radio itu sendiri merupakan sistem digital, seperti GSM, 3G ataupun 4G.

Hampir semua sistem telekomunikasi nirkabel bisa diintegrasikan dengan sistem RoF. Dengan mengintegrasikan suatu sistem telekomunikasi nirkabel pada sistem RoF, maka sistem telekomunikasi tersebut akan menjadi lebih sederhana dan efisien. Meskipun demikian, ada beberapa kelemahan yang terdapat pada sistem RoF yaitu adanya distorsi nonlinier yang sebagian besar disebabkan oleh sifat nonlinier dari laser diode. Disamping sifat nonlinier tersebut masih ada dispersi kromatik dari serat optik dan *noise* yang dibangkitkan oleh perangkat pengirim yang masih perlu untuk dipertimbangkan.

SC-FDMA pada dasarnya memiliki performansi *throughput* dan kompleksitas yang hampir sama dengan OFDMA. *Cyclic prefix* (CP) atau *guard interval* juga ditambahkan secara periodik pada saat pentransmisian sinyal untuk menghindari terjadinya *inter symbol interference* (ISI) dan penyederhanaan desain penerima (Harri Holma, 2009).

Berbeda dengan OFDMA dimana dua data simbol dimodulasikan langsung pada setiap *subcarrier* bebas dan ditransmisikan secara paralel, sistem SC-FDMA mentransmisikan data simbol pada masing-masing grup *subcarrier* secara berurutan data sebagai "*single carrier*". Sehingga, dalam setiap periode simbol pada semua *subcarrier* yang ditransmisikan oleh sinyal SC-FDMA membawa masing-masing komponen modulasi simbol. Pengaturan ini dapat mengurangi *envelope fluctuation* pada gelombang sinyal yang ditransmisikan. Oleh karena itu, SC-FDMA ini memiliki nilai *Peak-to-Average Power Ratio* (PAPR) yang lebih rendah daripada sinyal OFDMA (Hyung G. Myung, 2009).

Penggabungan dua teknologi ini yaitu teknik *multiple access* SC-FDMA dan RoF pada sisi uplink jaringan *mobile* LTE diharapkan dapat mengurangi *error* maupun rugi-rugi dalam sistem transmisi data, serta memberikan alokasi *bandwidth* dan kapasitas kanal yang lebih besar dibandingkan dengan teknologi nirkabel. Akan tetapi sejauh pengamatan penulis, keuntungan ini masih belum diungkap secara eksplisit dalam tulisan ilmiah. Skripsi ini akan mengkaji performansi teknik SC-FDMA pada teknologi *radio over fiber*,

melalui analisis matematis serta simulasi dengan menggunakan *software* Matlab 7.5.0.342 (R2007b).

1.2 Rumusan Masalah

Mengacu pada permasalahan yang telah diuraikan dalam latar belakang dan berdasarkan variabel bebas yang digunakan untuk perhitungan dalam skripsi yaitu

- panjang serat optik yang digunakan (25 km – 50 km)
- teknik modulasi yang digunakan (QPSK, 16-QAM dan 64-QAM)
- jenis *cyclic prefix* yang digunakan (*short dan long/extended*)
- panjang gelombang (1330nm, 1490nm dan 1550nm).

Maka rumusan masalah ditekankan pada:

1. Bagaimanakah performansi *signal to noise ratio* (SNR) sistem SC-FDMA pada RoF?
2. Bagaimanakah performansi kapasitas kanal sistem SC-FDMA pada RoF?
3. Bagaimanakah performansi *bit error rate* (BER) sistem SC-FDMA pada RoF?
4. Bagaimana performansi *bit rate* sistem SC-FDMA pada RoF?

1.3 Ruang Lingkup

Pembahasan pada skripsi ini meliputi :

1. Standarisasi teknologi LTE yang digunakan mengacu pada 3GPP *release* 8.
2. Teknik pentransmisian pada kanal *uplink* LTE menggunakan teknologi *Single Carrier Frequency Division Multiple Access* (SC-FDMA).
3. Teknologi modulasi yang digunakan adalah QPSK, 16-QAM dan 64-QAM.
4. Parameter sistem SC-FDMA yang akan dibahas berupa performansi SNR, kapasitas kanal, *bit rate*, serta BER.
5. Media transmisi yang digunakan adalah serat optik *single mode*.
6. Proses pengambilan data melalui simulasi, bukan percobaan secara langsung.
7. Analisis data dilakukan dengan menggunakan *software* Matlab 7.5.0.342 (R2007b).

8. Performansi yang diukur adalah performansi uplink dari user melalui *radio access point* atau *radio access unit* (RAP)/(RAU) selanjutnya melalui fiber dan menuju BTS utama.

1.4 Tujuan

Penulisan skripsi ini bertujuan untuk menganalisis aplikasi teknik *single carrier frequency division multiple access* (SC-FDMA) pada sistem *radio over fiber*, dengan mengamati SNR, kapasitas kanal, *bit rate*, dan BER sistem

1.5 Sistematika Penulisan

Skripsi ini terdiri atas 5 bab. Bab I adalah Pendahuluan, memuat tentang latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan, metodologi, dan sistematika penulisan. Bab II memuat Dasar Teori, membahas sistem RoF, teknik SC-FDMA, serta parameter performansi sistem SC-FDMA pada RoF. Pembahasan mengenai metode yang digunakan dalam penulisan skripsi seperti studi literatur, metode pengambilan data sekunder, metode perhitungan dan analisa data, dan metode pengambilan kesimpulan terdapat pada Bab III. Bab IV yaitu Hasil Perhitungan dan Pembahasan merupakan analisis hasil perhitungan serta simulasi mengenai penerapan OFDMA pada teknologi RoF. Kesimpulan dan saran yang diperoleh dari analisis perhitungan dan simulasi dibahas pada Bab V.

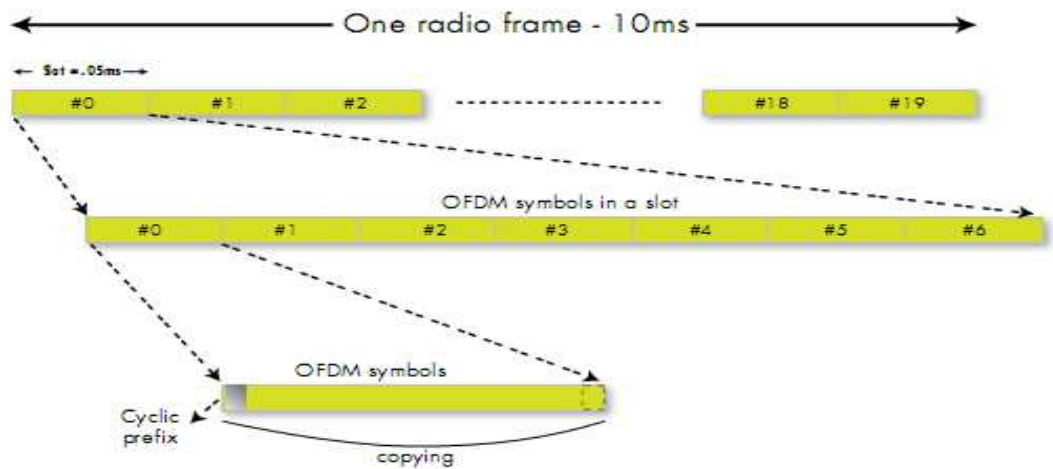
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Long Term Evolution* (LTE)

Long Term Evolution (LTE) adalah teknologi nirkabel keluaran terbaru 3GPP yang fokus pada *wireless broadband* dengan kecepatan akses secara teoritis 100 Mbps pada sisi *downlink* dan 50 Mbps pada sisi *uplink*. LTE menggunakan dua jenis teknik *multiple access* yaitu *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA) dengan *cyclic prefix* dan *Single Carrier Frequency Division Multiple Access* (SC-FDMA) dengan *cyclic prefix*. LTE dapat menggunakan mode dupleks FDD dan TDD untuk transmisi pada *paired* dan *unpaired spectrum* (IXIA, 2009).

Dapat dilihat pada **Gambar 2.1** Secara umum sistem *radio frame* pada LTE memiliki durasi waktu 10ms, terdiri dari 20 slot dengan masing-masing 0,5ms. Dua slot yang berdekatan membentuk *sub-frame* dengan durasi 1ms yang juga merupakan satu *transmit-time-interval* (TTI). Masing-masing slot terdiri dari tujuh simbol OFDM dengan *short/normal cyclic prefix* (CP) atau enam simbol OFDM dengan *long/extended* CP. Struktur *frame* padad dasarnya berlaku pada mode transmisi FDD dan TDD. Pada skripsi ini, metode transmisi yang digunakan adalah metode FDD.

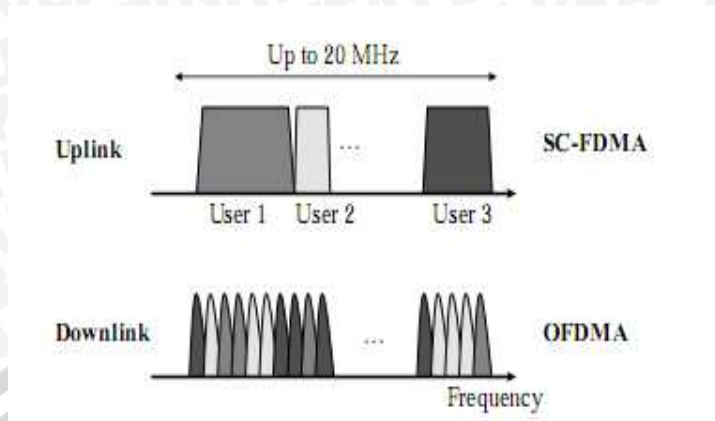


Gambar 2.1. Struktur *Frame* LTE

(Sumber: IXIA, 2009)

LTE mulai dikembangkan oleh 3GPP sejak tahun 2004. Teknologi LTE atau dikenal juga dengan istilah E-UTRAN (*Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network*) *release 8* yang diperkenalkan oleh 3GPP merupakan pengembangan dari teknologi sebelumnya yaitu HSPA (*High Speed Packet Access*) yang diharapkan dapat memenuhi target lebih baik dibandingkan dengan performansi dari HSPA dalam hal efisiensi *spectrum* frekuensi, *throughput* dan *latency* (Harri Holma, 2009).

Dengan dua teknik *multiple access* yang digunakan, *latency* pada LTE lebih rendah dibandingkan dengan HSPA yang adalah teknologi nirkabel keluaran 3GPP sebelumnya. Selain itu, kedua teknik *multiple access* yang digunakan juga memberikan ke-*orthogonal*-an antar *user*, mengurangi interferensi, serta mampu meningkatkan kapasitas kanal. Alokasi domain frekuensinya sebesar 180 kHz di sisi *uplink* dan *downlink* (Harri Holma, 2009). **Gambar 2.2** adalah skema *multiple access* pada LTE dimana ditunjukkan ke-*orthogonal*-an antar *user* pada pentranmisiannya.



Gambar 2.2 Skema *Multiple Access* LTE

(Sumber: Harri Holma, 2009)

Kapasitas jaringan yang besar akan menambah efisiensi dari arsitektur jaringan. Target dari LTE *release* 8 ini adalah meningkatkan *scalability* dari jaringan untuk meningkatkan *traffic* dan mengurangi *end-to-end latency* jumlah elemen jaringan.

2.1.1 Arsitektur LTE

Arsitektur jaringan LTE dirancang dengan tujuan untuk mendukung trafik *packet-switched* dengan mobilitas tanpa batas, *Quality of Service* (QOS), serta *latency* yang minimal. Pendekatan dengan *packet-switched* memungkinkan LTE untuk mendukung semua layanan termasuk layanan suara melalui koneksi paket. Arsitektur jaringan LTE hanya menggunakan dua jenis *node*, yaitu *evolved Node-B* (eNode-B) dan *Mobility Management Entity/Gateway* (MME/GW). Hal ini berbeda dengan banyak *node* yang berada pada hirarki arsitektur jaringan dari sistem 3G. Salah satu perubahan yang paling signifikan adalah *Radio Network Controller* (RNC) dieliminasi dari *path* data dan fungsinya sekarang tergabung dalam eNode-B. Kelebihan menggunakan *single-node* pada *access network* antara lain dapat mengurangi *latency* antar pelanggan dan pendistribusian beban RNC ke beberapa eNode-B. Pengeliminasian RNC pada *access network* karena sebagian sistem pada LTE tidak mendukung *macro-diversity* atau *soft-handoff*. (Farooq Khan, 2009).

2.1.2 Spesifikasi Teknis LTE

Tujuan utama dari arsitektur LTE antara lain: (Harri Holma, 2009)

Pada umumnya pengoptimalan untuk servis *packet-switched* ketika tidak perlu lagi modus *circuit-switched*

1. Pengoptimalan untuk *throughput* yang tinggi untuk *high bit rate* pada pelanggan
2. Peningkatan waktu respon untuk aktivasi dan *bearer* setup.
3. Perbaikan *delay* dalam pengiriman paket
4. Pengoptimalan *inter-working* dengan GPP *access network* maupun *wireless access network*

Dari semua target yang ingin dicapai di atas, dibutuhkan spesifikasi teknis yang baik. **Tabel 2.1** adalah spesifikasi teknis LTE.

Tabel 2.1. Spesifikasi Teknis LTE

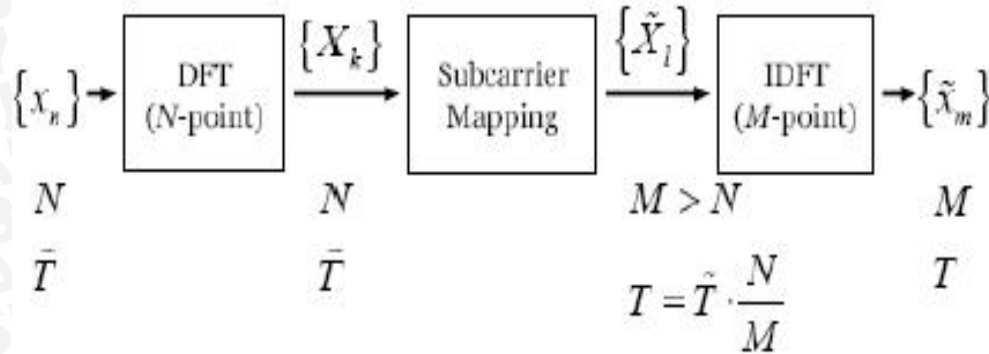
Parameter Spesifikasi Teknis	Jenis/Nilai
Peak data rates	100 Mbit/s untuk downlink 50 Mbit/s untuk <i>uplink</i>
<i>Average user throughput per MHz</i> than HSPA Release 6	3-4 <i>higher for</i> downlink 2-3 <i>higher for</i> uplink
<i>Mobility</i>	0-15 km/h (optimum) 15-120 km/h (<i>high performance garranted</i>) 120-350 km/h (<i>connection maintained</i>)
<i>Bandwidth</i>	1.25-20 MHz
<i>Spectrum allocation</i>	<i>Operation in paired spectrum (FDD) and unpaired spectrum (TDD) should be supported</i>
<i>Multiple access</i>	OFDMA (<i>downlink</i>) SC-FDMA (<i>uplink</i>)
MIMO	<i>Downlink</i> 2x2, 4x2, 4x4 <i>Uplink</i> 1x2, 1x4
<i>Modulation</i>	QPSK, 16-QAM, 64-QAM

Latency	5ms user-plane latency at IP layer, for one-way 100 ms control-plane latency from idle to active state
User per cell	At least 200 at 5MHz bandwidth At least 400 at bandwidth higher than 5MHz
Duplexing	FDD, TDD, Half-Duplex FDD

(Sumber: Farooq Khan, 2009)

2.2 Single Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA)

Sistem SC-FDMA dianggap sebagai sistem OFDMA yang ditambahkan operasi DFT, dimana simbol data dalam domain waktu ditransformasi ke domain frekuensi dengan menggunakan operasi DFT. Ortogonalitas dari *user*nya yaitu setiap *user* ditempatkan pada *subcarrier* yang berbeda dalam domain frekuensi. Dalam OFDMA juga berlaku sistem ortogonalitas seperti diatas. Karena dalam SC-FDMA transmisi sinyal secara keseluruhan merupakan *single carrier signal*, *Peak-to-Average Power Ratio* (PAPR) lebih rendah jika dibandingkan dengan OFDMA yang menghasilkan sinyal *muticarrier*. Transmitter SC-FDMA mengkonversi input sinyal biner menjadi serangkaian modulasi *subcarrier*. Pada input transmitter, modulator *baseband* mentransformasi input biner menjadi serangkaian multilevel dari bilangan kompleks (X_n) dalam beberapa format modulasi. Langkah pertama dalam modulasi *subcarrier* SCFDMA adalah melakukan N-point DFT untuk mendapatkan sinyal input dalam domain frekuensi (X_k). Kemudian setiap output N-point DFT dipetakan menjadi satu $M (> N)$ ortogonal *subcarrier* yang kemudian ditransmisikan. Jika $N = M/Q$ dan semua terminal mentransmisikan N simbol setiap bloknnya, maka sistem bias menangani Q secara simultan tanpa *co-channel interference*. Q adalah faktor perluasan *bandwidth* dari serangkaian simbol. Hasil dari *subcarrier mapping* adalah rangkaian X_l ($l = 0, 1, 2, \dots, M-1$) dari amplitudo *subcarrier*, dimana N dari amplitudo tidak sama dengan nol. Dalam domain waktu, durasi simbol data adalah T. Setelah melalui modulasi SC-FDMA durasi simbol data menjadi (N/M) Tsecond. Dalam OFDMA, M-point IDFT mentransformasikan amplitudo *subcarrier* menjadi sinyal dalam domain waktu kemudian ditransmisikan dalam satu rangkaian (Harri Holma, 2009). **Gambar 2.5** adalah blok diagram transmisi simbol pada SC-FDMA.



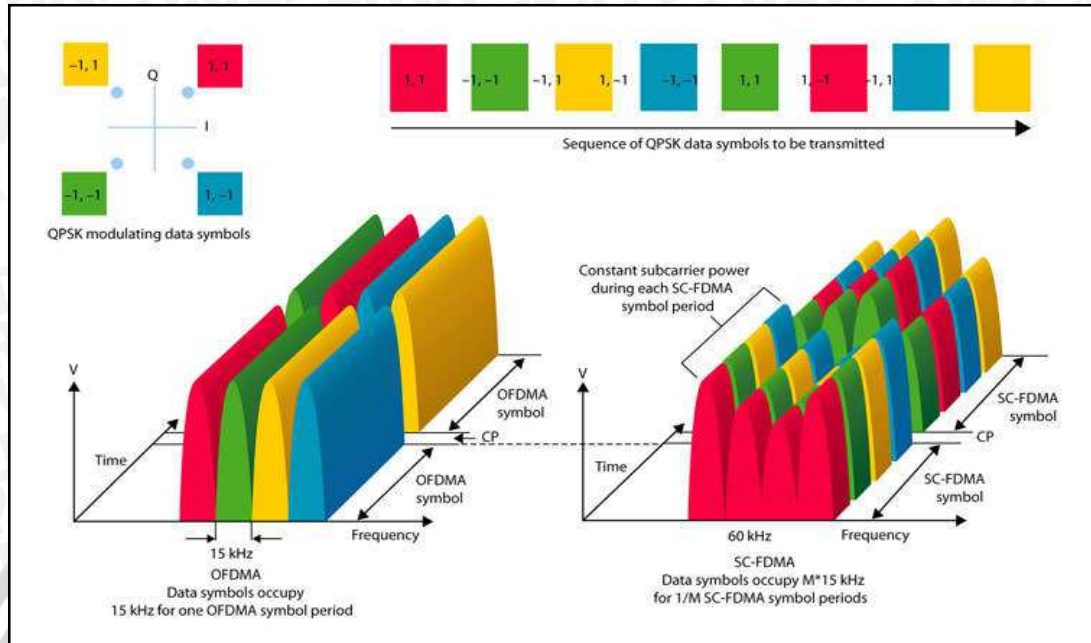
Gambar 2.3. Blok Diagram Transmisi Simbol SC-FDMA
(Sumber: digilib.itelkom.ac.id)

Di sisi penerima, sinyal yang diterima ditransformasi ke domain frekuensi menggunakan DFT, dipetakan kembali, dan dilakukan persamaan domain frekuensi. Karena SC-FDMA menggunakan modulasi *single carrier*, maka terjadi *intersymbol interference* (ISI) sehingga dibutuhkan *equalization* untuk mengatasi ISI. Selanjutnya sinyal ditransformasi ke domain waktu menggunakan IDFT. Deteksi dan *decoding* dilakukan dalam domain waktu.

DFT pada *transmitter* SC-FDMA memiliki 2 fungsi yaitu : mengubah sinyal dalam domain waktu menjadi domain frekuensi. Selain itu juga berfungsi untuk membuat frekuensi *multiplexing* atau *multiple access* walaupun menggunakan transmisi *single carrier*. Setiap user di-*multiplexing* dengan frekuensi yang berbeda-beda. Perbedaan antara SC-FDMA dan OFDMA adalah adanya penambahan operasi DFT di *transmitter* yang secara fisik membuat sinyal SC-FDMA dalam domain waktu (Putri Nurina, 2009).

SC-FDMA pada dasarnya mempunyai performansi *throughput* dan kompleksitas yang hampir sama dengan OFDMA. Sama seperti OFDMA, SC-FDMA membagi *bandwidth* transmisi menjadi beberapa *subcarrier* yang paralel, dengan *subcarrier* yang *orthogonal* satu dengan lainnya untuk mengirimkan informasi. *Cyclic prefix* (CP) atau *guard interval* juga ditambahkan secara periodik pada saat pentransmisisan sinyal untuk menghindari *inter symbol interference* (ISI) dan penyederhanaan desain penerima (Harri Holma, 2009).

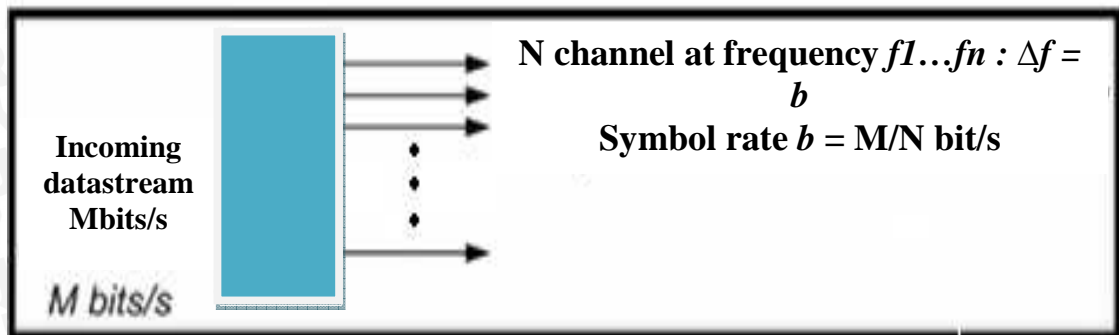




Gambar 2.4. Perbandingan Transmisi Simbol Data QPSK pada Teknologi OFDMA dan SC-FDMA
(Sumber: Moray Rumney, 2009)

2.2.1 Pembagian Aliran Data pada SC-FDMA

Prinsip dasar dari sistem SC-FDMA seperti yang telah dijelaskan, sama halnya dengan OFDMA yaitu membagi sebuah M laju data yang tinggi (*single high-rate bit stream*) menjadi N laju data rendah. Seperti yang terlihat pada **Gambar 2.5** ini :



Pada sistem SC-FDMA, laju transmisi total yang tersedia dibagi ke dalam beberapa *subcarrier* agar dapat mentransmisikan data dengan laju data rendah. Laju transmisi untuk

masing-masing *subcarrier* dari laju transmisi total yang tersedia dapat dinyatakan dengan persamaan (2.1) :

$$R_{sub} = \frac{R_{tot}}{N} \quad (2.1)$$

Dengan,

R_{sub} = laju transmisi masing-masing *subcarrier* (bps)

R_{tot} = laju tranmisi total (bps)

N = jumlah *subcarrier*

Durasi simbol untuk suatu modulasi pada masing-masing *subcarrier* dinyatakan dengan persamaan (2.2) :

$$T_{sub} = \frac{\log_2 \cdot M}{R_{sub}} = \frac{N \cdot \log_2 \cdot M}{R_{tot}} \quad (2.2)$$

Dengan,

T_{sub} = durasi simbol masing-masing *subcarrier* (s)

R_{sub} = laju transmisi masing-masing *subcarrier* (bps)

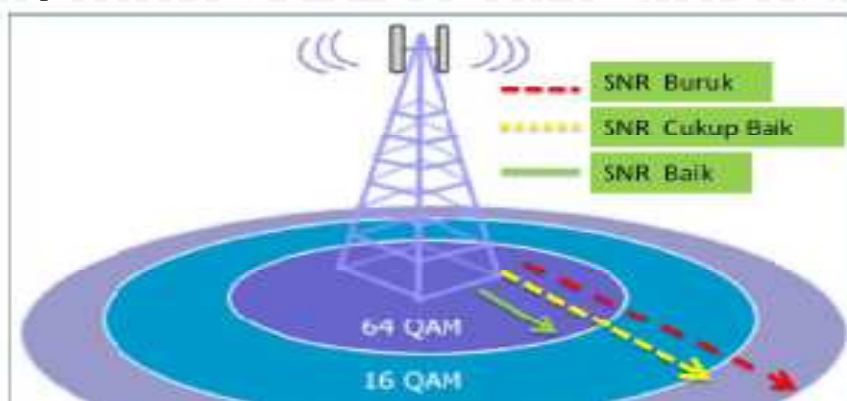
R_{tot} = laju tranmisi total (bps)

N = jumlah *subcarrier* pada terminal

M = jumlah kemungkinan sinyal: untuk modulasi QPSK nilai $M = 2^2 = 4$
 untuk modulasi 16-QAM nilai $M = 2^4 = 16$
 untuk modulasi 64-QAM nilai $M = 2^6 = 64$

2.2.2 Modulasi Adaptif

Modulasi adaptif, secara efektif dapat mengatur keseimbangan kebutuhan *bandwidth* dan kualitas sambungan (*link quality*) atau biasanya diukur dengan *Signal to Noise Ratio* (SNR). Semakin jauh jarak yang ditempuh maka redaman akan semakin besar dan menurunkan nilai SNR serta menyebabkan laju bit akan semakin rendah, sehingga menggunakan teknik modulasi dengan *rate* yang lebih rendah agar transmisi lebih bagus. Demikian juga sebaliknya, jarak yang dekat akan menghasilkan redaman yang kecil dan meningkatkan SNR serta laju bit akan semakin tinggi, sehingga dapat digunakan teknik modulasi yang menghasilkan *rate* tertinggi. Ada beberapa jenis modulasi yang digunakan dalam sistem SC-FDMA LTE yaitu QPSK, 16-QAM, dan 64-QAM. Untuk mempermudah dapat dilihat pada **Gambar2.6** di bawah ini:

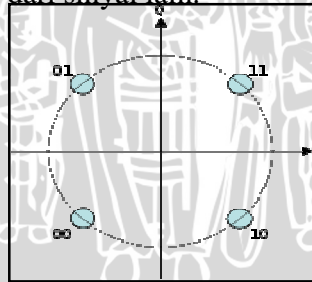


Gambar 2.6. Penggunaan Modulasi Adaptif Pada Kondisi *Link* Radio yang Berbeda

(Sumber :Sami H. O. Salih dan Mamoun M. A. Suliman, 2011)

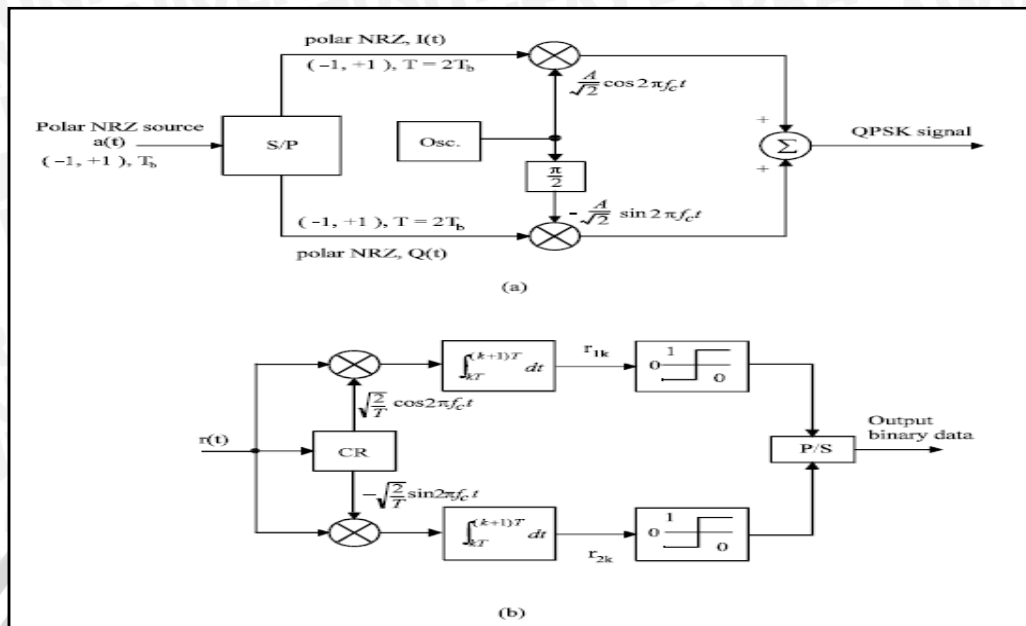
a) **Modulasi QPSK**

QPSK dikenal juga dengan *quaternary* atau *quadriphase* PSK atau 4 PSK. QPSK menggunakan 4 titik diagram *konstelasi* dengan mengirimkan 2 bit untuk setiap simbol (00, 01, 10, 11). Dengan menggunakan 4 fasa, QPSK dapat melakukan *encode* dua bit per *symbol*. Dalam QPSK ada empat fasa keluaran yang berbeda, maka harus ada empat kondisi masukan yang berbeda pula. Keunggulan QPSK adalah mampu mentransmisikan data dua kali lebih cepat dibandingkan dengan BPSK dan lebih efisien dalam penggunaan spektrum frekuensi. Sedangkan kelemahannya adalah kurang tahan terhadap *noise* dan rawan terjadi interferensi dari sinyal lain.



Gambar 2.7. Diagram konstelasi modulasi QPSK

(Sumber : Fuqin Xiong, 2006)



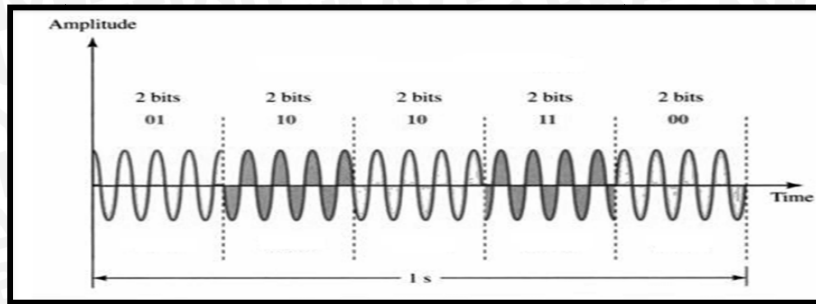
Gambar 2.8. (a) QPSK Modulator (b) QPSK Demodulator

(Sumber : Fuqin Xiong, 2006)

Dalam proses modulasinya, saluran dengan referensi kosinus disebut saluran *inphase* (I) dan saluran dengan referensi sinus disebut saluran *quadrature* (Q). Urutan data dipisahkan oleh *converter serial-to-paralel* (S/P) untuk membentuk urutan bit ganjil yang berada pada saluran-I dan urutan bit genap untuk saluran Q. Kemudian logika 1 dikonversi menjadi sebuah pulsa positif dan logika 0 dikonversi ke pulsa negatif, keduanya memiliki amplitudo yang sama dan durasi T. Selanjutnya bit ganjil bernomor urut dikalikan dengan $\cos 2\pi f_c t$ dan urutan bit genap dikalikan dengan $\sin 2\pi f_c t$. Jelas bahwa sinyal saluran I dan sinyal saluran Q adalah sinyal BPSK dengan durasi simbol $2T_b$. Akhirnya hasil penjumlahan dua bentuk gelombang ini menghasilkan sinyal QPSK (Fuqin Xiong, 2006).

Dalam proses demodulasinya, hasil akhir dari *demodulator* hanya output *multiplexing* saluran I dan saluran Q. Jadi kesalahan *bit rate* untuk hasil akhir adalah sama untuk setiap saluran. Simbol A merupakan dua bit dari masing-masing saluran I dan saluran Q. Simbol kesalahan terjadi jika salah satu dari kedua bit mengalami kesalahan.



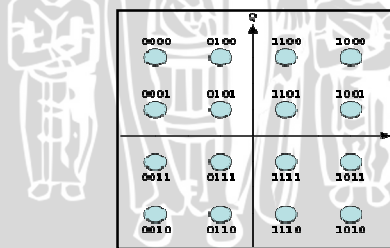


Gambar 2.9. Sinyal pada *Quadrature Phase Shift Keying* (QPSK).

(Sumber : Behrouz A. Forouzan, 2000)

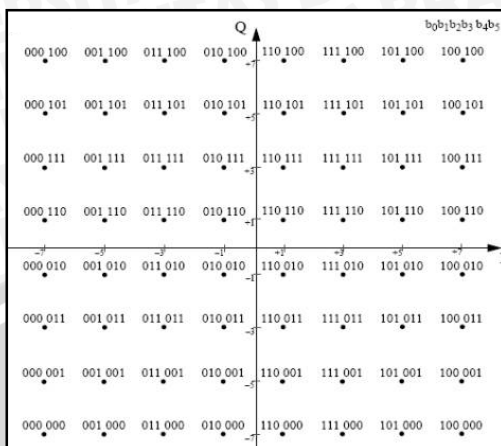
b) *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM)

QAM merupakan teknik modulasi yang merupakan perpaduan antara ASK dan PSK. Sehingga pada QAM, amplitudo dan fasa sinyal *carrier* akan berubah terhadap perubahan amplitudo sinyal informasi, yang mengakibatkan sinyal direpresentasikan dalam besaran amplitudo dan pergeseran fasa. Modulasi QAM membawa data dengan merubah parameter dari sinyal *carrier* untuk merespon sinyal. Dalam hal ini, amplitudo dua sinyal *carrier* QAM yang berbeda fasa 90 derajat antara satu dengan lainnya diubah untuk mendapatkan sinyal yang diinginkan. Jenis modulasi QAM yang digunakan dalam teknologi LTE adalah 16-QAM dan 64-QAM.



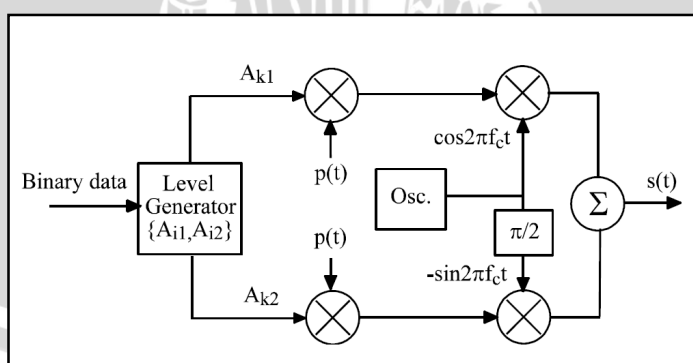
Gambar 2.10. Diagram Konstelasi 16-QAM

(Sumber : Fuqin Xiong, 2006)

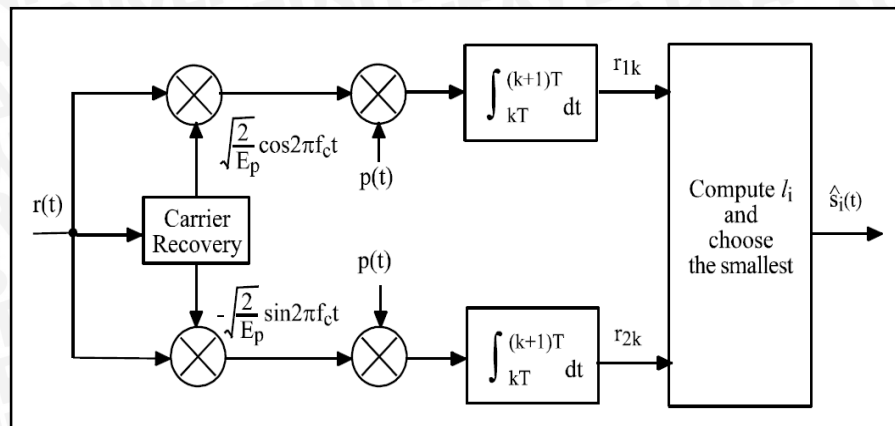


Gambar 2.11. Diagram konstelasi 64 QAM
(Sumber : Fuqin Xiong, 2006)

Dalam sebuah sinyal QAM, terdapat dua operator, masing-masing memiliki frekuensi yang sama tetapi berbeda dalam tahap 90 derajat atau satu seperempat dari sebuah siklus, dari hal tersebut maka timbul istilah *quadrature*. Satu sinyal disebut sinyal I, dan sinyal yang lain dinamakan sinyal T. Salah satu sinyal dapat diwakili oleh sebuah gelombang sinus, dan sinyal lainnya dengan gelombang kosinus. Kedua sinyal tersebut digabungkan pada sumber untuk transmisi. Di tempat tujuan, sinyal informasi dan pembawa dipisahkan, sinyal informasi diambil dari masing-masing sinyal pembawa, dan kemudian digabungkan menjadi satu sinyal. (Fuqin Xiong, 2006)



(Sumber : Fuqin Xiong, 2006)



Gambar 2.13. QAM demodulator

(Sumber : Fuqin Xiong, 2006)

2.2.3 Kanal Propagasi

Kanal merupakan suatu media transmisi yang digunakan untuk mentransmisikan informasi dari pemancar ke penerima. Dalam sistem nirkabel, yang tentunya menggunakan media nirkabel, terdapat dua macam gangguan yang dinilai memiliki efek signifikan terhadap sistem. Gangguan tersebut adalah *noise/derau* dan *fading*.

2.2.4 Kanal AWGN Pada Sistem SC-FDMA

Kanal *Additive White Gaussian Noise* (AWGN) adalah kanal ideal yang hanya memiliki *noise* AWGN. Kanal ideal berarti kanal ini tidak menyebabkan distorsi (perubahan bentuk sinyal) pada sinyal yang dikirim. Artinya kanal ideal memiliki *bandwidth* tidak terbatas dan respon frekuensinya tetap untuk segala frekuensi.

Noise AWGN merupakan *noise* yang pasti terjadi dalam jaringan nirkabel manapun, memiliki sifat-sifat *additive*, *white*, dan *gaussian*. Sifat *additive* artinya *noise* ini dijumlahkan dengan sinyal, sifat *white* artinya *noise* tidak bergantung pada frekuensi operasi sistem dan memiliki rapat daya yang konstan, dan sifat *gaussian* artinya besarnya tegangan *noise* memiliki rapat peluang terdistribusi *gaussian*.

Besarnya daya AWGN dapat dilihat dari persamaan (2.3) di bawah ini:

$$N_o = k \cdot T \cdot B \tag{2.3}$$

Dengan :

- k = konstanta Boltzman (1.38×10^{-23} J/K)
- T = temperature operasi sistem ($^{\circ}$ K)

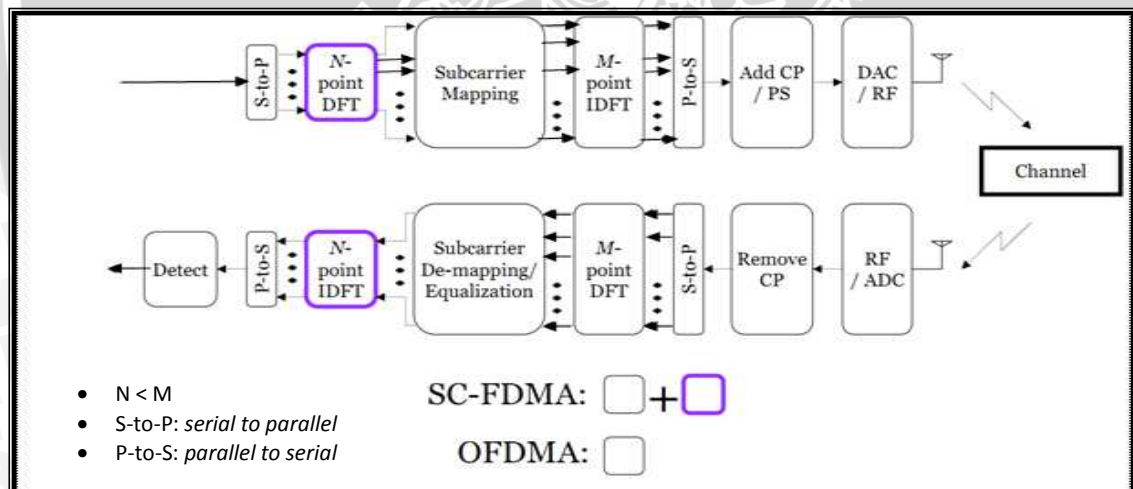
B = bandwidth (Hz)

Dari persamaan (2.5) dapat dipahami bahwa keberadaan *noise* AWGN dalam jaringan telekomunikasi manapun, akan selalu ada selama terdapat *bandwidth* dan temperatur perangkat telekomunikasi yang bekerja pada suhu di atas -273° K.

2.2.5 SC-FDMA Signal Processing

Gambar 2.16 menunjukkan bagaimana transmitter SC-FDMA mengirimkan satu blok data ke penerima. Pada prakteknya, sistem mengadopsi teknik modulasi untuk kualitas kanal (disebut juga modulasi adaptif), yaitu menggunakan *Quadrature Phase Shift Keying* (QPSK) pada kanal yang lemah sampai 64-level *Quadrature Amplitude Modulation* (64-QAM) pada kanal yang kuat.

Pada data blok DFT terdiri dari *M-complex modulation symbol* dalam domain waktu di ubah ke dalam domain frekuensi. Subcarrier mapping pada sisi transmitter menempatkan modulasi simbol domain frekuensi pada subcarrier, proses mapping biasa disebut *scheduling*. Blok IDFT menghasilkan representasi sinyal domain waktu pada *N-subcarrier* simbol.

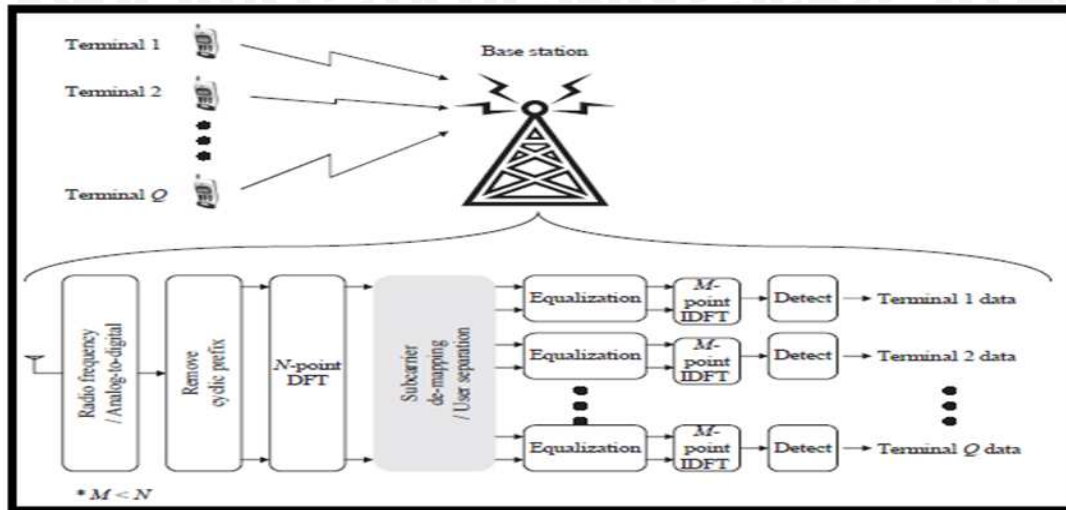


Gambar 2.14. Diagram blok sistem SC-FDMA

(Sumber :Hyung G. Myung, 2009)

Blok DFT pada sisi penerima, mentransformasikan sinyal yang diperoleh ke domain frekuensi untuk mengembalikan kondisi awal *N-subcarrier*. Operasi *de-mapping* memisahkan sampling dari *M-domain* frekuensi pada masing-masing sinyal informasi. IDFT mentransformasikan simbol kembali ke domain waktu, dimana *detector* nantinya akan memodulasi simbol yang berurutan. Sebelum sistem melakukan proses demodulasi

pada penerima SC-FDMA, eNode-B membagi *user* pada domain frekuensi pada saat proses *de-mapping subcarrier* (Hyung G. Myung, 2009). Semua proses di atas ditunjukkan pada **Gambar 2.15**.



Gambar 2.15. Struktur *Receiver* SC-FDMA dengan terminal-Q sisi *Uplink*

(Sumber: Hyung G. Myung, 2009)

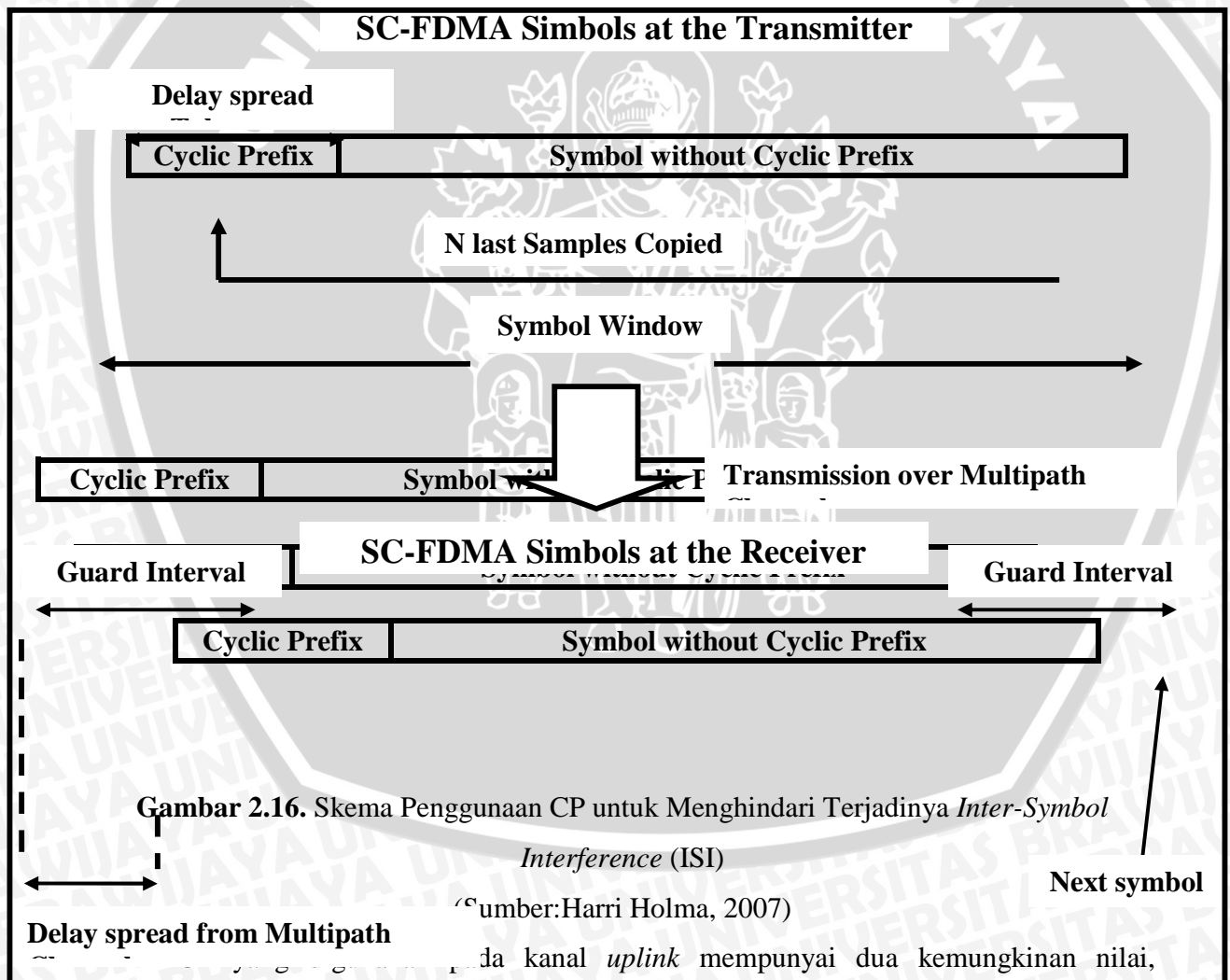
2.2.6 Konversi Serial ke Paralel (S/P)

Data yang akan dipancarkan umumnya dalam bentuk aliran data serial. Pada SC-FDMA, proses konversi serial ke paralel dibutuhkan untuk mengubah aliran bit data serial ke dalam data-data yang akan dipancarkan dalam setiap simbol SC-FDMA. Data yang dialokasikan untuk setiap simbol tergantung pada teknik modulasi yang digunakan dan jumlah *subcarrier*. Hasil dari proses konversi serial ke paralel merupakan proses pengisian *payload* data untuk setiap *subcarrier*. Pada sisi penerima terjadi proses yang berkebalikan, dimana data dari *subcarrier* (data paralel) diubah kembali ke dalam aliran data serial aslinya. Proses yang terjadi pada penerima ini disebut juga dengan proses konversi paralel ke serial.

2.2.7 *Guard Interval dan Cyclic Prefix (CP)*

Setelah dilakukan pentransmisi sinyal, setiap pelanggan harus dapat dipisahkan pada sisi penerima, tetapi pada kenyataannya proses ini tidak mudah karena propagasi gelombang di udara yang banyak menimbulkan masalah, seperti adanya pengaruh kanal *multipath* yang dapat menyebabkan terjadinya *inter-symbol interference (ISI)*. Oleh karena itu, pada setiap simbol SC-FDMA ditambahkan CP untuk menghindari terjadinya ISI. CP

diperoleh dari menyalin bagian akhir dari tiap simbol dan kemudian akan diletakkan pada bagian awal simbol. CP bertindak sebagai *guard interval* diantara simbol yang berdekatan, apabila panjang dari *guard interval* yang dialokasikan lebih besar daripada maksimum *delay spread* pada kanal ($T_{CP} \geq \tau_{max}$), maka tidak akan terjadi ISI. Maksimum *delay spread* didapat dari selisih *delay* antara panjang sinyal *path* yang terpanjang dan terpendek (Harri Holma, 2007). **Gambar 2.3** menunjukkan skema penggunaan CP pada SC-FDMA.



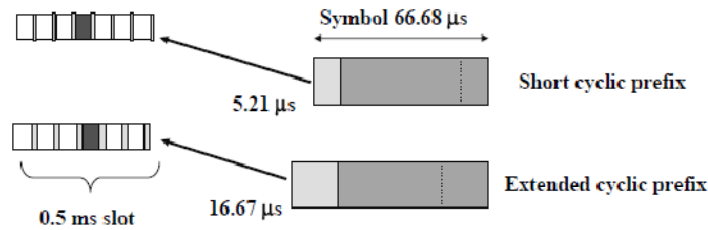
Gambar 2.16. Skema Penggunaan CP untuk Menghindari Terjadinya *Inter-Symbol*

Interference (ISI)

Delay spread from Multipath

da kanal *uplink* mempunyai dua kemungkinan nilai, tergantung apakah *short* (normal) *cyclic prefix* atau *extended cyclic prefix* yang akan

diaplikasikan, sehingga total durasi simbol SC-FDMA setelah penambahan CP adalah T_{sub}
 $= T_s + T_{cp}$



Gambar 2.17. Short dan Extended Cyclic Prefix

(Sumber: Harri Holma, 2007)

Bandwidth antar subcarrier setelah penambahan cyclic prefix sama dengan invers dari durasi simbol tanpa cyclic prefix. Secara matematis bandwidth subcarrier dapat dituliskan dengan (Hara, 2003):

$$\Delta f = \frac{1}{T_s} = \frac{1}{T_{sub} - T_{cp}} \quad (2.4)$$

Sehingga total bandwidth sistem dari sejumlah subcarrier yang digunakan, setelah penambahan CP digambarkan pada persamaan (2.5):

$$\begin{aligned} B_{sistem} &= \frac{2}{T_{sub}} + \frac{N-1}{(1-\alpha_{cp}) \cdot T_{sub}} \\ B_{sistem} &= \frac{2(1-\alpha_{cp}) + N-1}{(1-\alpha_{cp}) \cdot T_{sub}} \\ B_{sistem} &= \frac{2(1-\alpha_{cp}) + N-1}{(1-\alpha_{cp}) \cdot \frac{R_{tot} \cdot \log_2 M}{N}} \\ B_{sistem} &= \frac{R_{tot} [2(1-\alpha_{cp}) + N-1]}{(1-\alpha_{cp}) \cdot N \cdot \log_2 M} \end{aligned} \quad (2.5)$$

Dengan :

B_{sistem} = bandwidth sistem (Hz)

T_s = durasi simbol SC-FDMA (s)

T_{sub} = durasi simbol masing-masing subcarrier (s) disebut juga “useful symbol length”

T_{cp} = durasi cyclic prefix (s)

R_{tot} = laju bit total yang tersedia (bps)

M = jumlah kemungkinan sinyal

N = jumlah *subcarrier*

α_{cp} = faktor *cyclic prefix*

2.3 Radio over Fiber (RoF)

2.3.1 Pengenalan RoF

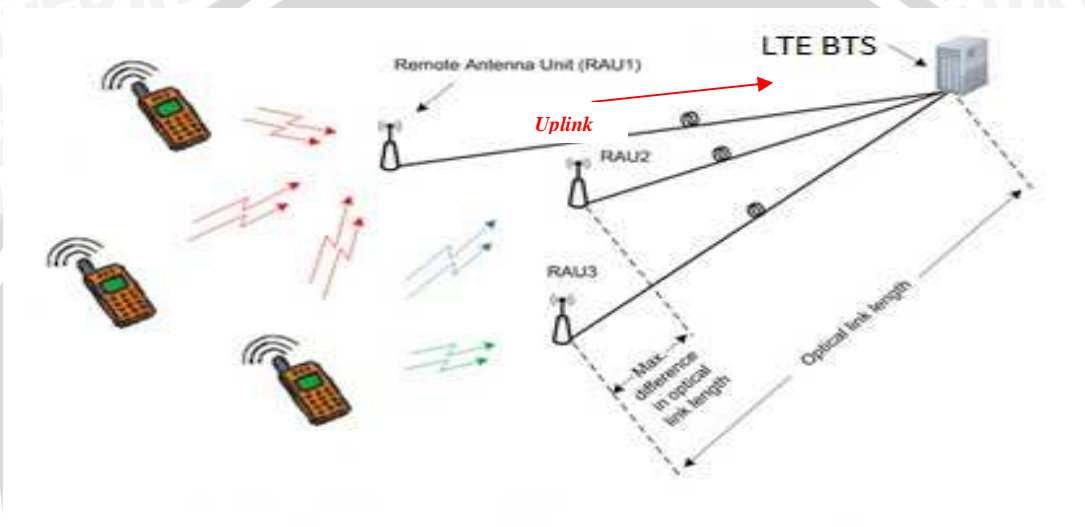
Permintaan kebutuhan *data rate* yang tinggi serta tuntutan *broadband* yang terus meningkat beberapa tahun terakhir ini, menjadikan teknologi RoF dan *fiber to the home* (FTTH) kandidat yang menjanjikan untuk jaringan nirkabel maupun kabel. Tingginya biaya yang diperlukan apabila penggunaan dua teknologi ini secara terpisah memerlukan integritas untuk menyatukan dua jaringan ini dalam satu infrastruktur. Perhatian utamanya adalah mengirimkan kedua sinyal frekuensi baik *radio frequency* (RF) dan *base band* (BB) pada panjang gelombang tunggal melalui serat tunggal dengan cara yang hemat biaya dan performansi yang tangguh (Abd El-Naser A. Mohamed, 2011).

RoF bekerja berdasarkan prinsip penggabungan segi kelebihan dari serat optik dan nirkabel. Tujuannya agar pengguna dapat menikmati performansi yang lebih bagus daripada nirkabel, tetapi tidak semahal pada instalasi kabel serat optik. Dalam cakupan daerah area nirkabel, dapat dipasang *link* RoF antar RAU untuk memancarkan sinyal sebesar daerah sel mikro. Hal tersebut memungkinkan tercakupnya seluruh *coverage area* yang semestinya dapat dijangkau oleh nirkabel, dan dengan adanya *link radio over fiber*, maka kualitas sinyal dapat dipertanggungjawabkan dan diharapkan performansi yang diterima oleh pelanggan akan lebih baik (Jonas S, 2009).

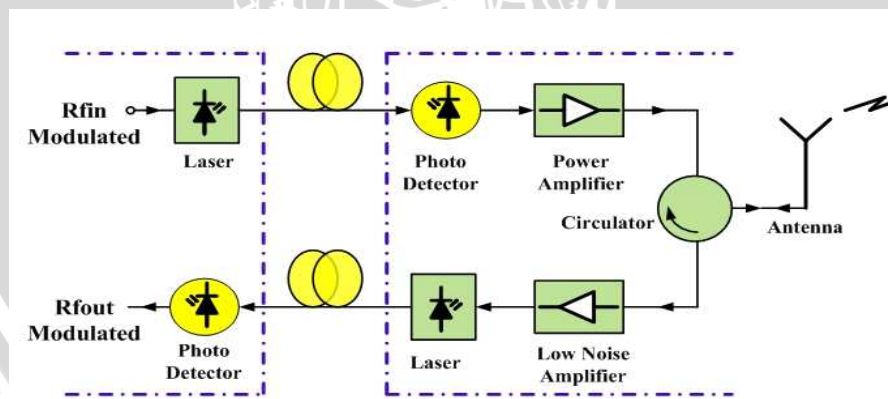
Serat optik merupakan media transmisi dengan rugi-rugi rendah serta *bandwidth* yang lebar, oleh sebab itu, RoF dapat mengurangi kompleksitas antena. Transmisi dalam sistem ini terletak pada frekuensi karier radio, sedangkan sebelumnya terletak pada sistem *base band* digital. Jalur optik pada RoF adalah analog, sehingga akan mereproduksi gelombang karier. Sinyal karier radio ini dapat dimodulasi dengan skema modulasi digital seperti GMSK atau QPSK.

Pada RoF, sinar laser dimodulasi oleh sinyal radio dan dikirimkan melalui media serat optik. Modulasi ini bersifat analog karena sinyal kariernya adalah sinyal analog. Konfigurasi dasar dari jalur serat optik analog terdiri dari *interface bidirectional*, yaitu *transmitter* laser analog serta penerima *photodiode* yang terletak pada *base station* atau *remote antenna unit*, yang dipasangkan dengan *transmitter* laser analog serta penerima

photodiode yang terletak pada *radio processing unit*. Satu atau lebih serat optik menghubungkan RAU dengan sentral. Jumlah *base station* (BS) dan *remote antenna unit* dapat dikurangi untuk mendapatkan daya yang lebih rendah serta *bandwidth* yang lebih lebar. Maka dari itu, integrasi antara nirkabel serta jaringan optik menjadi solusi untuk mengurangi biaya pengiriman suara dan data, sementara menaikkan kapasitas jaringan. Untuk memudahkan memahami konsep RoF di atas, dapat dilihat **Gambar 2.18** di bawah ini :



Gambar 2.18. Konsep RoF
(sumber: Anthony Ng'oma, 2002)



Gambar 2.19. Sistem Fiber-Radio
(sumber: <http://www.eda.kent.ac.uk>)

Sedangkan Gambar 2.19 menunjukkan Jalur Modulasi Sistem RoF, di mana sinyal masukan RF diaplikasikan pada *laser diode* untuk memodulasi intensitas cahaya keluaran. Untuk transmisi dengan *loss* rendah melalui serat silika digunakan panjang

gelombang 1300, 1490 dan 1550 nm. Serat optik yang digunakan dapat berupa *multi mode* maupun *single mode*. *Single mode* digunakan pada jaringan dengan jarak p-i-n *photodiode* lebih dari beberapa puluh meter, yang menghasilkan daya keluaran RF sebanding dengan kuadrat dari daya masukan optik. Tipe ini disebut dengan *intensity modulated-direct detection* (IM-DD), yang sering digunakan karena sederhana dan biaya yang lebih rendah.

Inti dari teknologi RoF ialah penggunaan link serat optik untuk mendistribusikan sinyal RF dari Base Station (BS) ke Remote Antenna Unit (RAU). Pada sistem komunikasi nirkabel yang umum, fungsi pemrosesan sinyal RF seperti menaikkan frekuensi, modulasi *carrier* dan *multiplexing* dilakukan di BS dan kemudian diteruskan ke antena. RoF memungkinkan untuk melakukan pemusatan fungsi pemrosesan sinyal RF pada *central base station* (BSC), dan kemudian menggunakan serat optik yang memiliki rugi-rugi yang cukup rendah yaitu 0,2 dB/km untuk panjang gelombang 1550nm, 0,24 dB/km untuk panjang gelombang 1490nm dan 0,35dB/km untuk panjang gelombang 1310nm untuk mendistribusikan sinyal RF ke RAU, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.18 (Anthony Ng'oma, 2005).

Dengan melakukan hal ini maka RAU secara signifikan menjadi lebih sederhana. Sentralisasi fungsi pemrosesan sinyal RF memungkinkan pemakaian peralatan secara bersama, alokasi *resource* secara dinamis, dan menyederhanakan sistem operasi dan perawatan. Hal ini berarti penghematan besar pada instalasi dan operasional sistem, terutama pada sistem komunikasi *broadband* nirkabel dengan cakupan luas dengan jumlah BS banyak.

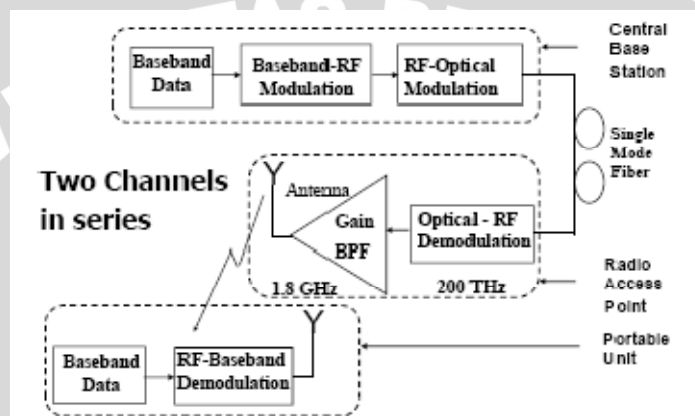
Pada sistem RoF, sinyal RF memodulasi sinyal optik kemudian ditransmisikan melalui link serat optik menuju penerima. Untuk memodulasi sinyal optik ini dilakukan dengan sistem *Intensity Modulation Direct Detection* (IMDD). Sistem IMDD mempunyai dua kemungkinan metode implementasi. Sinyal pembawa optik dapat dimodulasi secara langsung atau eksternal. Untuk frekuensi standar nirkabel (GSM, WiFi, 802.11a/b/g, UMTS, 4G), lebih sesuai apabila menggunakan modulasi langsung dan fiber jenis *single mode*, dikarenakan *loss* transmisi kecil, kemudahan instalasi, biaya murah dan ukuran kecil.

Sinyal RF digunakan untuk memodulasi langsung laser diode di BSC. Hasil dari intensitas modulasi sinyal optik kemudian dikirimkan melalui fiber ke RAU. Pada RAU,

sinyal RF yang ditransmisikan dibangkitkan kembali dengan deteksi langsung menggunakan *photodetektor* PIN. Sinyal tersebut kemudian dikuatkan dan diradiasikan oleh antena. Sinyal *uplink* dikirimkan dari RAU ke BS dengan cara yang sama. Performansi sinyal inilah yang didokumentasikan dalam skripsi ini.

2.3.2 Arsitektur RoF

Dalam penerapannya, RoF merupakan penggabungan antara komunikasi kabel dan nirkabel, sehingga dalam arsitekturnya terdapat komponen *transceiver* dari komunikasi nirkabel yaitu BTS dan menggunakan media transmisi berupa serat optik.



Gambar 2.20. Arsitektur RoF

(Sumber: Xavier Fernando, 2004)

Pada Gambar 2.20 dapat dilihat bahwa sinyal yang dikirim oleh BTS disalurkan melalui serat optik. Hal ini bertujuan supaya komunikasi dapat menjangkau tempat yang lebih jauh dengan biaya yang rendah.

Untuk mengubah sinyal elektrik yang dikirimkan oleh BTS menjadi sinyal optik, dibutuhkan pengubah dari elektrik menjadi optik di sisi pengirim, serta sebaliknya, konversi optik menjadi elektrik di sisi penerima.

Komponen dasar arsitektur RoF adalah:

a. Base Station

Base station yang digunakan dapat berupa *transceiver* jenis apapun yang digunakan untuk kepentingan WLAN, WMAN, maupun WiMAX dan sistem komunikasi lainnya, bergantung pada aplikasi *radio over fiber*. BTS ini menghasilkan sinyal RF untuk ditransmisikan oleh serat optik ke *subscriber*. Sisi *base station* ini terdiri dari pemrosesan data *baseband* melalui modulator RF, sumber optik serta modulator optik.

b. Sumber Optik

Sumber optik yang digunakan dalam RoF adalah laser, karena laser memiliki intensitas yang lebih tinggi dan spektrum cahaya (*line width spectral*) yang lebih kecil dibandingkan LED sehingga cahaya dapat melalui serat optik dengan dispersi yang lebih sedikit.

Pada laser, terdapat *noise* yang disebut dengan *Relative Intensity Noise* (RIN). RIN merupakan noise laser yang diukur secara langsung di sisi *transmitter*. Noise ini muncul akibat fluktuasi acak pada intensitas sinyal optik. RIN dapat mengakibatkan fluktuasi nyata dari intensitas cahaya yang dihasilkan oleh laser dan fluktuasi frekuensi cahaya yang dapat menurunkan sinyal jika serat optik terdispersi. Menurut Abd El-Naser A. Mohamed, et al. 2011, nilai RIN dinyatakan dengan:

$$\langle I_{RIN}^2 \rangle = RIN \cdot I_D^2 \cdot B \quad (2.6)$$

dengan:

$\langle I_{RIN}^2 \rangle$ = *Relative Intensity Noise*
 RIN = parameter RIN (dB/Hz)
 I_D = arus DC rata-rata (A)
 B = *bandwidth* sistem (Hz)

c. Modulator Optik (Konverter Elektrik-Optik)

Sinyal informasi ditransmisikan melalui jalur optik dengan menggunakan sinyal elektrik untuk memodulasi intensitas cahaya yang disuntikkan ke dalam kanal serat optik. Konversi E/O ini dapat dicapai dengan modulasi langsung atau dengan menggunakan sumber berintensitas konstan yang diikuti dengan modulator eksternal.

Pada modulasi langsung, cahaya dari laser dimodulasi secara langsung oleh sinyal radio. Metode ini efektif dan memberikan performansi yang cukup baik untuk frekuensi sinyal radio yang kurang dari orde GHz (Fernando, 2001).

d. Serat Optik

Sinyal yang telah dimodulasi ditransmisikan menuju penerima melalui serat optik berbahan silika yang dirancang memiliki rugi-rugi yang kecil pada panjang gelombang yang dimiliki sumber optik. Sinyal ini mengalami atenuasi dan distorsi ketika melalui media optik. Beberapa jenis rugi-rugi yang mempengaruhi performansi serat optik adalah (Muttaqien, 2008):

1. Redaman karakteristik serat optik

Redaman karakteristik serat optik tergantung dari panjang gelombang cahaya yang digunakan. Koefisien redaman karakteristik serat optik biasanya diberikan oleh pabrik dalam satuan dB/km.

2. Redaman sambungan

Kabel serat optik biasanya dibuat dengan panjang antara 1 km sampai dengan 5 km, oleh karena itu diperlukan beberapa kabel yang harus disambungkan untuk menghubungkan antar transmisi. Besarnya redaman sambungan tergantung dari teknik penyambungan yang digunakan dan besarnya redaman antara 0,1 sampai 0,5 dB.

3. Redaman konektor

Konektor optik adalah perangkat mekanik yang berfungsi untuk menghubungkan serat optik secara meyakinkan, dengan disekrup secara bersama-sama, sehingga *core* dari kedua ujung tersebut akan tersambung menjadi satu, namun demikian tidak dapat dihindarkan adanya redaman konektor.

Ketiga redaman tersebut memberikan redaman total saluran optik L_{op} sebesar (Fernando, 2006):

$$L_{op} = 2(n_c l_c + n_s n_s + \alpha(\lambda) l_f) \tag{2.7}$$

dengan:

- L_{op} = redaman total dalam saluran optik (dB)
- n_c = jumlah konektor yang digunakan
- l_c = koefisien redaman konektor (dB)
- n_s = jumlah sambungan sepanjang jalur serat optik yang digunakan
- l_s = koefisien redaman sambungan (dB)
- $\alpha(\lambda)$ = koefisien redaman serat optik (dB/km)
- l_f = panjang serat optik yang digunakan (km)

Selain redaman, terdapat *noise* yang terjadi pada saluran optik, yaitu *shot noise* dan *thermal noise*.

1. Shot Noise

Shot noise terjadi karena cahaya dikomposisikan menjadi paket energi diskrit yang disebut foton, yang membawa sinyal sebagai sebuah aliran energi kuantum yang sangat kecil, bukan sebagai energi yang mengalir dengan lancar. Sifat acak dari waktu sampai setiap foton menghasilkan *noise* acak pada arus keluaran fotodioda. Menurut Mohamed, et al. 2011, nilai *shot noise* dinyatakan dengan:

$$\langle I^2_{shot} \rangle = 2 \cdot q \cdot \langle I_D \rangle \cdot B \tag{2.8}$$

dengan:



- $\langle I^2_{shot} \rangle$ = shot noise
- q = muatan *electron* (1.6×10^{-19} C)
- $I_D(t)$ = arus DC rata-rata yang terdeteksi (A)
- B = *bandwidth* sistem (Hz)

2. Thermal Noise

Thermal noise merupakan *noise* yang timbul akibat komponen yang terdapat dalam sisten, misalnya akibat adanya komponen resistif di dalam sistem. Ketika sistem digunakan, komponen resistif akan menyerap arus yang mengalir dan mengubahnya menjadi energi panas. Energi panas di dalam sistem ini menjadi *noise* karena dapat menurunkan performansi sistem. Menurut Mohamed, et al. 2011, nilai *thermal noise* dinyatakan dengan:

$$\langle I^2_{th} \rangle = \frac{4.K.T.B}{R} \tag{2.9}$$

dengan:

- $\langle I^2_{th} \rangle$ = *thermal noise*
- K = konstanta Boltzmann (1.38×10^{-20} mW/kHz)
- T = suhu absolute (300 K)
- B = *bandwidth* sistem (kHz)
- R = hambatan beban (ohm)

Noise dalam saluran optik dinyatakan dalam (Mohamed, et al. 2011):

$$E[n_{op}^2(t)] = (\langle I^2_{shot} \rangle + \langle I^2_{RIN} \rangle + \langle I^2_{th} \rangle) \tag{2.10}$$

Selain *noise* dan redaman tersebut, dalam transmisi serat optik terjadi dispersi sinyal optik, yaitu pelebaran sinyal optik pada daerah waktu yang akan menimbulkan perubahan bentuk sinyal atau penyatuan beberapa sinyal optik pada kecepatan transmisi yang tinggi. Dengan demikian dispersi merupakan salah satu pembatas kecepatan transmisi dalam system transmisi serat optik.

Pada *radio over fiber* yang menggunakan serat optik *single mode*, dispersi yang terjadi adalah dispersi material (Mohamed, et al. 2011). Dispersi material disebabkan oleh variasi indeks bias dengan panjang gelombang atau frekuensi cahaya yang digunakan dalam serat optik. Ini menimbulkan dispersi pulsa karena sumber cahaya tidak terdiri dari frekuensi tunggal sehingga akan menjalar dengan kecepatan yang berbeda.

$$\tau_m = \Delta\lambda.l.D_m \tag{2.11}$$

Dengan:

- τ_m = dispersi bahan (ps)
- $\Delta\lambda$ = lebar spektrum sumber optik (nm)
- D_m = koefisien dispersi bahan (ps/nm.km)
- l = panjang serat optik (km)



a. Radio Access Point

RAP berfungsi untuk mengubah sinyal optik yang ditransmisikan melalui serat optik menjadi sinyal RF untuk ditransmisikan kembali ke *subscriber*. Proses yang terjadi di RAP hanya proses perubahan sinyal optik menjadi sinyal RF untuk ditransmisikan melalui antena ke *subscriber*, sehingga konfigurasi RAP tidak kompleks seperti BTS. RAP ini terdiri dari beberapa komponen, yaitu *photodetector*, *Gain BPF*, dan antena.

e. Photodetector (Konversi Optik-Elektrik)

Photodetector (PD) digunakan untuk melakukan proses konversi O/E. Sebuah fotodiode biasa digunakan sebagai *photodetector* pada komunikasi optik. *Photodiode* merupakan sebuah alat yang menghasilkan arus listrik dari daya optik yang diterima. Setelah pendeteksian, sinyal elektrik dikuatkan dengan *amplifier* elektrik dengan gain G_{op} yang besarnya bervariasi, bergantung pada spesifikasi alat yang digunakan.

f. Gain BPF

Gain yang diberikan di sisi RAP hanya diberikan pada rentang frekuensi tertentu yang merupakan frekuensi kerja sistem.

g. Antena

Digunakan untuk memancarkan sinyal RF ke *subscriber*.

h. Portable Unit/Mobile Station

Portable unit merupakan *mobile station subscriber*, yaitu *handset* yang digunakan oleh *subscriber* untuk melakukan komunikasi. Dalam MS, terjadi proses demodulasi sinyal RF menjadi frekuensi *baseband*.

2.4 Performasi Sistem SC-FDMA pada Teknologi Radio over Fiber (RoF)

2.4.1 Laju data/Peak bit rate

Target untuk LTE *release 8* pada transmisi *uplink* mampu mengirimkan data dengan kecepatan 86 Mbps (menggunakan 64-QAM). Besarnya laju data tergantung pada teknik modulasi yang digunakan, untuk teknik modulasi QPSK membawa 2 bit/symbol, untuk teknik modulasi 16-QAM membawa 4 bit/symbol, sedangkan untuk teknik modulasi 64-QAM membawa 6 bit/symbol. Untuk menghitung besarnya *peak bit rate*, dinyatakan dengan persamaan (Harri Holma, 2007):

$$Peakbitrates = \frac{bitpersymbol}{Hz} \times N \times \frac{jumlahsimbolpersubframe}{1 ms} \times (1 - \alpha_{CP})Kbps \quad (2.12)$$

Dengan,



N = jumlah *subcarrier*

α_{CP} = faktor *cyclic prefix*

2.4.2 Rugi-Rugi Propagasi *Non-Line of Sight* (NLOS)

Pada propagasi gelombang radio, semakin jauh jarak antara pengirim dan penerima akan mengakibatkan daya sinyal yang diterima oleh penerima semakin kecil. Hal ini disebabkan adanya redaman saat pentransmisian sinyal dari pengirim ke penerima maupun sebaliknya, baik pada kondisi *line of sight* (LOS) maupun *non-line of sight* (NLOS). Sistem komunikasi LTE bekerja pada kondisi NLOS, yang berarti terdapat penghalang sinyal antara pengirim dan penerima seperti rumah, pohon-pohon dan gedung. Kondisi ini menyebabkan sinyal yang dikirim oleh pemancar mengalami pantulan, difraksi atau *scattering*, sehingga sinyal tersebut memiliki lebih dari satu jalur dari pengirim ke penerima. Propagasi NLOS sering disebut propagasi *multipath*.

LTE masih masuk dalam *range* kerja pemodelan Erceg yang berkisar antara 1.900 MHz < f < 3.500 MHz. Rumus perhitungan *path loss* dari tiap *base station* dengan Erceg model adalah (Deris Riyansyah, 2010) :

$$PL = A + 10 \cdot \gamma \cdot \log_{10}(d/d_0) + \Delta PL_f + \Delta PL_h + s \text{ dB} \quad (2.13)$$

Dengan,

PL = rugi-rugi propagasi (dB)

A = *pathloss* referensi (dB)

γ = eksponen *pathloss*

d = jarak pengirim ke penerima (m)

d_0 = jarak referensi *pathloss* (100 m)

s = efek *shadow* (dB)

ΔPL_f = faktor koreksi terhadap frekuensi kerja yang digunakan

ΔPL_h = faktor koreksi terhadap tinggi antenna *receiver*

Dengan *pathloss* referensi (A) dirumuskan sebagai berikut (Deris Riyansyah, 2010):

$$A = 20 \text{ Log}_{10} \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot c \cdot d_0}{f} \right) \quad (2.14)$$

Dengan,

A = *pathloss* referensi (dB)

f = frekuensi operasi (Hz)

d_0 = jarak referensi *pathloss* (100 m)

c = kecepatan gelombang radio di udara (m/s)

Dengan eksponen *pathloss* (γ) dirumuskan sebagai berikut:

$$\gamma = a - b \cdot h_b + \frac{c}{h_b} \quad (2.15)$$

Dengan,

- γ = eksponen *pathloss*
- a, b, c = konstanta yang tergantung pada tipe *terrain*
- h_b = tinggi antena *Base Station* (m)

Besarnya Nilai a, b, c dan s adalah konstanta berdasarkan daerah yang akan dilayani, yaitu berdasarkan tipe daerah/bangunan yang ada di daerah tersebut. Adapun nilai a, b, c dan s dapat dilihat dalam Tabel 2.2

Tabel 2.2 Parameter untuk Tipe *Terrain* yang Berbeda

Parameter	Type A	Type B	Type C
A	4,6	4	3,6
B	0,0075	0,0065	0,005
C	12,6	17,1	20
Efek shadow (s)	10,6	9,6	8,2

(Sumber: Kwang-Cheng and J. Roberto B. de Marca, 2008)

Keterangan :

Tiga macam skenario propagasi

Keterangan:

Terrain Type A :

- daerah banyak gedung bertingkat/pepohonan maupun berbukit,
- banyak penghalang sinyal,

Terrain Type B

- daerah dengan gedung bertingkat/pepohonan cukup banyak, umumnya kota berkembang,
- sedikit penghalang sinyal,

Terrain Type C :

- daerah dengan gedung bertingkat/pepohonan sedikit,
- jarang atau tidak ada penghalang sinyal.

Untuk faktor koreksi frekuensi LTE dinyatakan dalam persamaan (2.16):

$$\Delta PL_f = 6 \text{Log}_{10} \left(\frac{f}{2000} \right) \quad (2.16)$$

dengan:

f = frekuensi operasi sistem (Hz)

ΔPL_f = faktor koreksi frekuensi LTE

Sedangkan untuk faktor koreksi tinggi antenna *subscriber station* pada LTE

dinyatakan dalam persamaan (2.17):

$$\Delta PL_h = -10.8 \text{Log}_{10} \left(\frac{h_{UE}}{2} \right), \text{ Untuk tipe terrain A dan B}$$

$$\Delta PL_h = -20 \text{Log}_{10} \left(\frac{h_{UE}}{2} \right), \text{ Untuk tipe terrain C} \quad (2.17)$$

dengan:

h_{UE} = tinggi antenna penerima (m)

ΔPL_h = faktor koreksi tinggi antenna *subscriber station* LTE

2.4.3 Signal to Noise Ratio (SNR)

Dalam teknologi *radio over fiber* (RoF), terdapat dua macam propagasi, nirkabel dan kabel. Maka SNR total sistem merupakan hasil dari dua propagasi tersebut. Dalam Fernando, X.N (2004) dinyatakan bahwa SNR RoF adalah:

$$SNR = \frac{m^2 I_D^2 10^{-L_{op}/10} E[s^2(t)]}{E[n_{op}^2(t)] + \left(E[n_{el}^2(t)] \left(\frac{L_{el}}{G_{op}} \right)^2 \right)} \quad (2.18)$$

dengan:

SNR = *signal to noise ratio* (dB)

m = indeks modulasi optik

I_D = arus DC rata-rata yang terdeteksi (A)

$E[s^2(t)]$ = daya masukan RF (daya pancar) (dBm)

L_{op} = rugi-rugi total dalam saluran serat optik (dB)

$E[n_{op}^2(t)]$ = total *noise* saluran optik (dBm)

L_{wl} = rugi-rugi propagasi (PL)

G_{op} = gain *amplifier* optik (W)

Rugi-rugi total dalam saluran optik, dipengaruhi oleh koefisien rugi-rugi optik (α) serta panjang gelombang, yaitu:

$$L_{op} = 20 \text{ dB} + 2\alpha(\lambda)l_f \quad (2.19)$$

dengan:

α = koefisien rugi-rugi optik (dB/km)

l_f = panjang serat optik (km)

Sedangkan *noise* pada saluran optik dinyatakan dalam:

$$E[n_{op}^2(t)] = (\langle I_{shot}^2 \rangle + \langle I_{RIN}^2 \rangle + \langle I_{th}^2 \rangle) B \quad (2.20)$$

Dengan:

$$I_{shot}^2 = \text{shotnoise } (A^2)$$

$$I_{RIN}^2 = \text{Relative Intensity Noise } (A^2)$$

$$I_{th}^2 = \text{noisethermal } (A^2)$$

$$B = \text{Bandwidth sistem (Hz)}$$

2.4.4 Kapasitas Kanal Sistem

Dalam teorema Shannon, besarnya kapasitas kanal diperoleh dari persamaan berikut Wilson(1996) :

$$C = B_{sistem} \cdot \log_2(1 + SNR_{sistem}) \quad (2.21)$$

dengan :

C = kapasitas kanal sistem (bps)

B_{sistem} = bandwidthsistem(Hz)

SNR_{sistem} = signal to noise ratio sistem (dB)

Bandwidth sistem dalam saluran optik ditentukan oleh dispersi yang terjadi di dalam serat optik. Dalam Abd.Naser (2011) dinyatakan bahwa *bandwidthradio over fiber* adalah:

$$B_{sistem} = \frac{0.44}{\Delta\tau_{sistem} \times L} \quad (2.22)$$

$$\Delta\tau_{sistem} = \sqrt{(\Delta\tau_{sumber})^2 + (\Delta\tau_{receiver})^2 + (\Delta\tau_{mat})^2} \quad (2.23)$$

dengan:

L = panjang serat optik yang digunakan (km)

$\Delta\tau_{sistem}$ = dispersi sistem (ps)

$\Delta\tau_{sumber}$ = rise time sumber (ps)

$\Delta\tau_{receiver}$ = rise time penerima (ps)

$\Delta\tau_{mat}$ = dispersi material (ps)

2.4.5 Bit Rate

Bit rate yang dibahas dalam skripsi ini merupakan *bit rate* sistem di dalam saluran optik saja, hal ini dirumuskan oleh Xavier Fernando(2004) dalam:

$$B_{R(NRZ)} = \frac{0.7}{\Delta\tau_{sistem}} \quad (2.24)$$

$$\Delta\tau_{sistem} = \sqrt{(\Delta\tau_{sumber})^2 + (\Delta\tau_{receiver})^2 + (\Delta\tau_{mat})^2} \quad (2.25)$$

$$\Delta\tau_{mat} = -\left(\frac{L \cdot \Delta\lambda \cdot \lambda}{c}\right) \left(\frac{d^2n}{d\lambda^2}\right) \quad (2.26)$$

dengan:

L = panjang serat optic (km)

c = kecepatan cahaya (m/s)

$\Delta\lambda$ = lebar spectral sumber optik (nm)

λ = panjang gelombang yang digunakan (nm)

$\frac{d^2n}{d\lambda^2}$ = turunan kedua dari indeks bias terhadap panjang gelombang

$\Delta\tau$ = *disperse*

2.4.6 Bit Error Rate (BER)

BER (*bit error rate*) bit merupakan nilai ukur kualitas sinyal yang diterima untuk sistem transmisi data digital. BER juga dapat didefinisikan sebagai perbandingan jumlah bit *error* terhadap total bit yang diterima. Nilai BER dipengaruhi oleh *signal to noise ratio* sistem. BER sistem dinyatakan dalam Hara(2003) :

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{SNR_{sistem}} \right) \quad (2.27)$$

dengan :

BER = *bit error rate* sistem

SNR_{sistem} = *signal to noise ratio* sistem (dB)

$\operatorname{Erfc}(x)$ = fungsi kesalahan dari variabel (x)

BAB III METODE PENELITIAN

Skripsi ini mengacu pada studi literatur dalam menganalisa performansi *Single Carrier Frequency Division Multiple Access* (SC-FDMA) pada teknologi *Radio over Fiber* (RoF) di sisi *uplink* jaringan LTE *release* 8. Data-data sekunder yang penting untuk pengerjaan skripsi ini antara lain mengenai karakteristik, parameter serta teori yang tercantum pada BAB II. Sedangkan parameter performansi yang dikaji dalam skripsi ini meliputi SNR, Kapasitas kanal, BER dan bit rate, dengan spesifikasi *bandwidth* yang dibutuhkan sistem SC-FDMA. Metodologi yang digunakan dalam pembahasan skripsi ini yaitu:

1. Studi Literatur
2. Pengambilan Data
3. Perhitungan dan Analisis Data
4. Pengambilan Kesimpulan

3.1 Studi literatur

Studi literatur bertujuan untuk memahami konsep-konsep yang berkaitan dengan permasalahan yang akan dikaji dalam skripsi ini untuk mendukung tahap selanjutnya yaitu pengambilan data. Hal ini dilakukan untuk mendapatkan pembahasan dari rumusan masalah mengenai performansi SC-FDMA pada teknologi RoF pada sisi *uplink* LTE.

3.2 Pengambilan data

Pengambilan data dilakukan untuk memperoleh data-data yang diperlukan dalam menyelesaikan skripsi ini. Data-data yang diperlukan pada skripsi ini berupa data sekunder yang bersumber dari buku referensi, jurnal, skripsi, internet, dan forum-forum resmi mengenai mengenai LTE dan SC-FDMA. Data sekunder yang digunakan dalam pembahasan skripsi ini adalah sebagai berikut :

1. Teknologi *Long Term Evolution* (LTE)

Standar jaringan LTE yang digunakan merupakan LTE yang dikeluarkan oleh 3GPP yaitu LTE *release* 8 berdasarkan buku yang berjudul "*LTE for UMTS OFDMA and SC-FDMA Based on Radio Access*" yang ditulis oleh Harri Holma dan Antti Toskala pada tahun 2009, "*Single Carrier-FDMA a New Air Interface for LTE*" yang

ditulis oleh Hyung G. Myung pada tahun 2009 dan beberapa forum resmi mengenai LTE meliputi pengertian, konfigurasi, arsitektur, dan protokol.

2. *Single Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA)*

Kanal propagasi yang digunakan dalam sistem SC-FDMA adalah kanal propagasi Okomura-Hatta dengan kanal *noise* AWGN. Kinerja sistem SC-FDMA yang meliputi parameter SNR, kapasitas kanal, bit rate dan BER merujuk pada buku "*LTE for 4G Mobile Broadband*" yang ditulis oleh Farooq Khan pada tahun 2009.

Sehingga didapatkan data sekunder berupa parameter-parameter jaringan LTE dengan penggunaan skema SC-FDMA yaitu:

- a. *Bandwidth* kanal yang digunakan adalah 10 MHz.
- b. Teknik modulasi yang digunakan adalah QPSK, 16-QAM, 64-QAM.
- c. Frekuensi *carrier* yang digunakan adalah pada 2600 MHz.

3. *Cyclic Prefix (CP)*

Sesuai dengan buku yang berjudul "*LTE for UMTS OFDMA and SC-FDMA Based on Radio Access*" yang ditulis oleh Harri Holma dan Antti Toskala pada tahun 2009, durasi CP yang digunakan pada kanal *uplink* LTE dengan SC-FDMA ada dua yaitu *short* atau normal CP dengan durasi 5,21 μ s dan *long* atau *extended* CP dengan durasi 16,67 μ s.

4. *Radio over Fiber (RoF)*

Data-data sekunder mengenai teknologi RoF untuk penyelesaian skripsi ini didapatkan dari buku yang berjudul "*Radio over Fiber-an optical technique for wireless access.*" yang ditulis oleh Xavier Fernando pada tahun 2009 dan juga buku "*Design of a Radio-over-Fiber system for wireless LANs*" yang ditulis oleh A. Ng'oma pada tahun 2002.

3.3 **Perhitungan dan Analisis data**

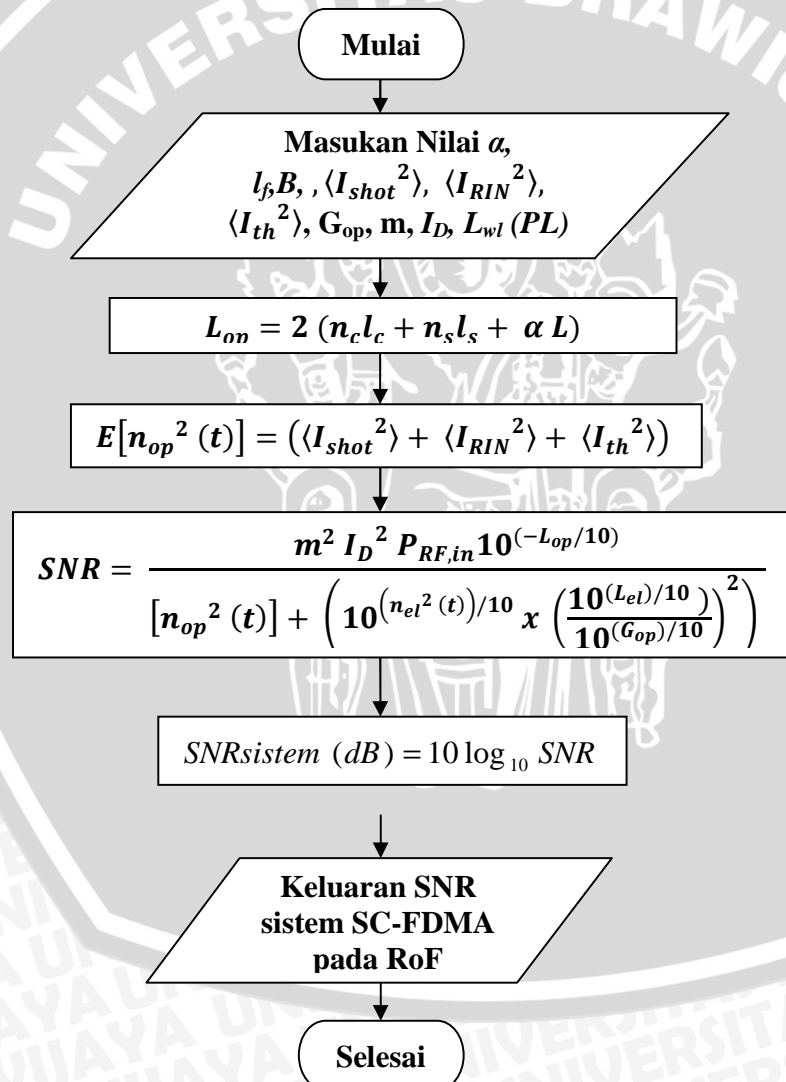
Metode perhitungan dan analisis data yang digunakan dalam pembahasan skripsi ini adalah mengumpulkan beberapa nilai parameter dari data sekunder sesuai dengan standar 3GPP *release 8*. Parameter-parameter yang diperoleh digunakan untuk analisis berdasarkan rumusan masalah yang telah diuraikan sebelumnya. Perhitungan dalam skripsi ini menggunakan *software* Matlab 7.5.0.342 (R2007b) untuk mempermudah dalam proses

perhitungan dan penyajian grafik. Perhitungan dan analisis data yang dilakukan dalam skripsi ini meliputi parameter sebagai berikut :

1. *Signal-to-noise ratio* (SNR),
2. Kapasitaskanal,
3. *Bit error rate* (BER),
4. *Bit rate*.

Berikut langkah-langkah perhitungan untuk mendapatkan nilai parameter yang diinginkan :

1. Perhitungan *signal to noise ratio* (SNR) sistem, dengan cara :



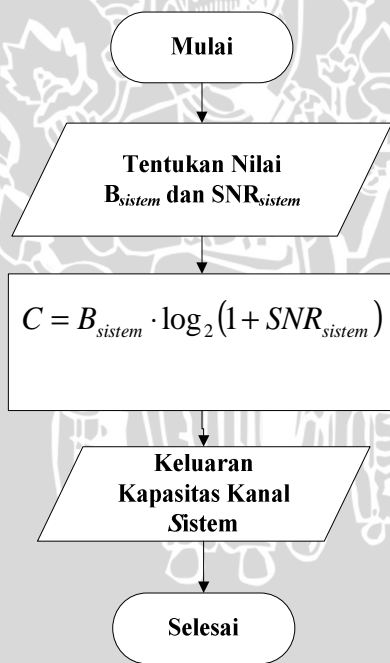
Gambar 3.1 Diagram Alir Perhitungan *Signal To Noise Ratio* (SNR) Sistem.

(Sumber :Perancangan, 2012)

dengan :

- SNR = *signal to noise ratio* (dB)
- m = indeks modulasi optik
- I_D = arus DC rata-rata yang terdeteksi
- $E [s^2(t)]$ = daya masukan RF (daya pancar) (dBm)
- L_{op} = rugi-rugi total dalam saluran serat optik
- $E[n_{op}^2(t)]$ = total *noise* saluran optik
- L_{wl} = rugi-rugi propagasi (PL)
- G_{op} = gain *amplifier* optik
- B = *bandwidth* (Hz)
- SNR_{sistem} = *signal to noise ratio* sistem (dB)
- a_{cp} = factor *cyclic prefix*
- α = koefisien rugi-rugi optik (dB/km)
- l_f = panjang serat optik (km)
- I_{shot}^2 = *shot noise*
- I_{RIN}^2 = *Relative Intensity Noise*
- I_{th}^2 = *noise thermal*

2. Perhitungan kapasitas kanal, dengan cara:



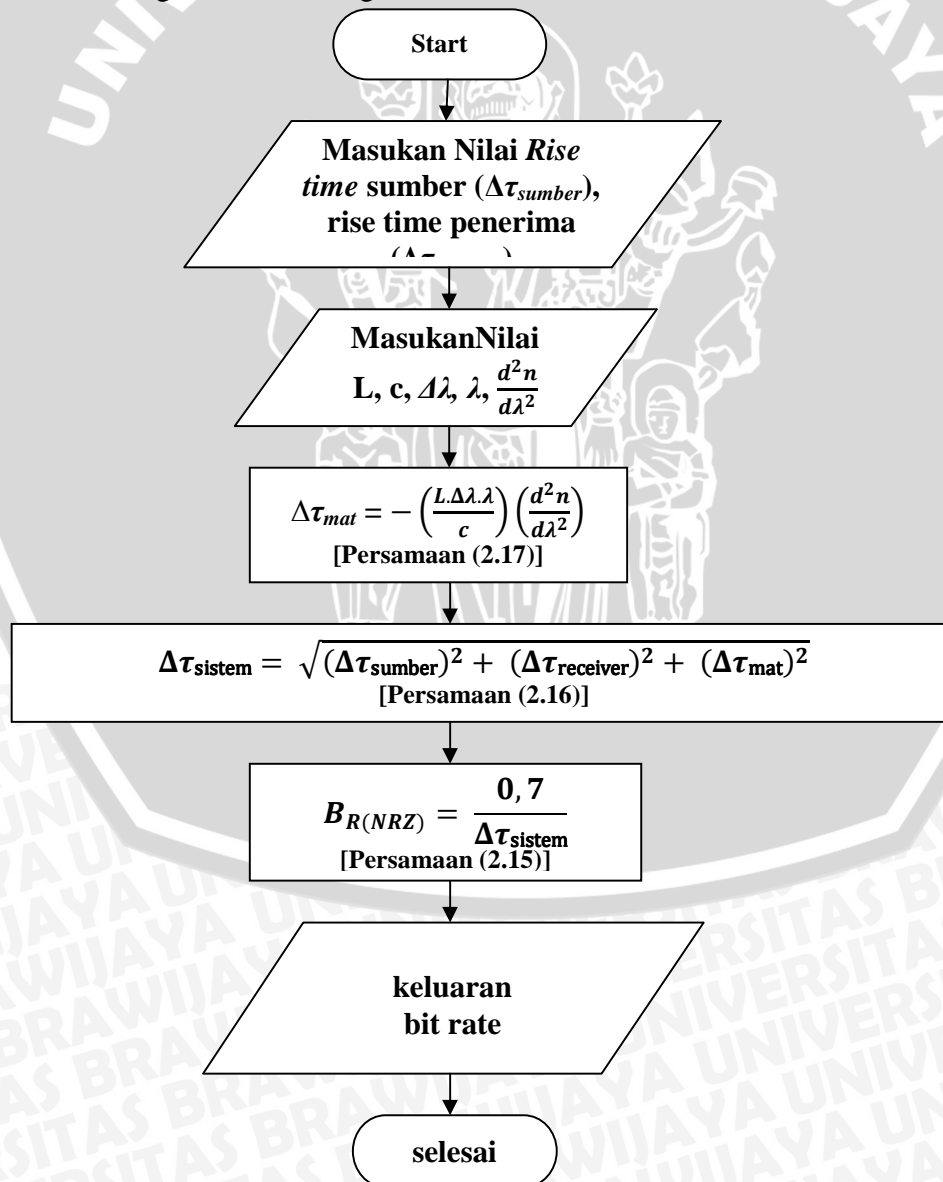
Gambar 3.2 Diagram alir perhitungan kapasitas kanal (C) SC-FDMA.

(Sumber :Perancangan, 2012)

dengan :

- C = kapasitas kanal sistem (bps)
- B_{sistem} = *bandwidth* sistem(Hz)
- SNR_{sistem} = *signal to noise ratiosistem* (dB)

3. Perhitungan *bit rate*, dengan cara:



Gambar3.3 Diagram alir perhitungan *bit rate* sistem

(Sumber: Perancangan, 2012)

Dengan :

L = panjang serat *optik*

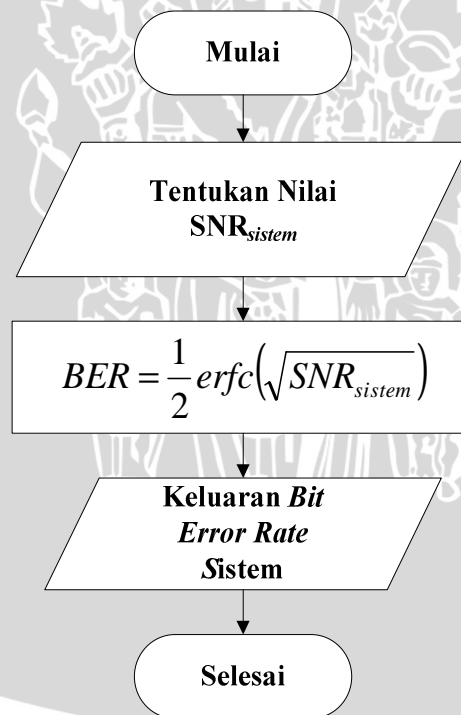
c = kecepatan cahaya

$\Delta\lambda$ = lebar *spectral* sumber *optik*

λ = panjang gelombang yang digunakan

$\frac{d^2n}{d\lambda^2}$ = turunan kedua dari indeks bias terhadap panjang gelombang

4. Perhitungan *Bit error rate* (BER), dengan cara:



Gambar 3.4 Diagram alir perhitungan BER sistem

(Sumber: Perancangan, 2012)

Dengan,

BER = *Bit Error Rate* (BER) sistem (Mbps)



SNR_{sistem} = *Signal-to-Noise ratio* sistem (dB)

$erfc(x)$ = fungsi kesalahan dari variabel (x), dengan $erfc(x) \approx \frac{1}{\sqrt{\pi x}} e^{-x^2}$

3.4 Pengambilan kesimpulan dan saran

Pengambilan kesimpulan merupakan tahapan terakhir. Pada tahapan ini, dilakukan pengambilan kesimpulan berdasarkan teori, hasil analisis serta perhitungan yang telah dilakukan sebelumnya. Selanjutnya dilakukan pemberian saran kepada pembaca sehingga nantinya dapat dijadikan dasar pengembangan atau referensi untuk karya tulis selanjutnya

BAB IV ANALISIS DAN HASIL

Bab IV skripsi ini merupakan analisis dan pembahasan mengenai performansi SC-FDMA pada teknologi RoF di sisi uplink LTE berdasarkan teori dan persamaan yang ada pada bab II dan III. Parameter-parameter yang dianalisis adalah SNR, kapasitas kanal, BER dan *bit rate*. Dengan variable bebas berupa teknik modulasi yang digunakan QPSK, 16-QAM dan 64-QAM lalu panjang gelombang yang digunakan meliputi 1310nm, 1490nm dan 1550nm dan yang terakhir adalah *cyclic prefix* (CP) yg digunakan ialah *short* dan *long/extended* Panjang CP adalah 5,21 μ s dan 16,67 μ s berdasarkan model propagasi yang digunakan yaitu model Okomura-Hata dengan kanal *noise* AWGN. **Tabel 4.1** menampilkan spesifikasi LTE untuk model Propagasi Okomura-Hata:

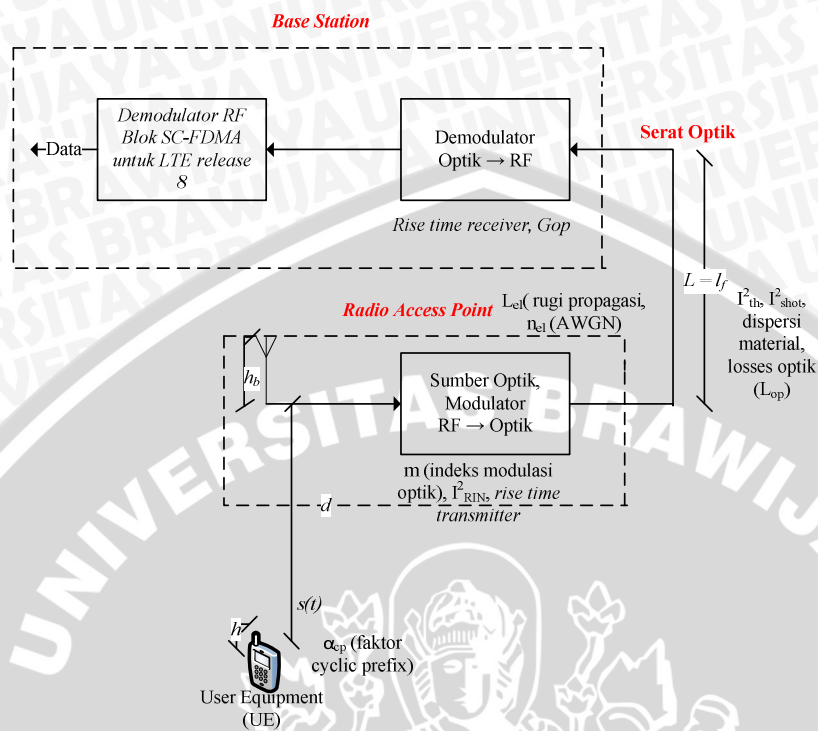
Tabel 4.1 Spesifikasi LTE untuk Model Propagasi Okomura-Hata

Parameter	Nilai
Frekuensi Kerja	2600 MHz
Metode Duplex	FDD, TDD

Kanal Bandwidth	1,4Mhz, 3MHz, 5MHz, 10MHz, 15MHz, 20MHz
Modulasi	QPSK, 16-QAM, 64-QAM
Radius Cell	<i>Terrain A</i> (Rural) 300 – 800 meter
	<i>Terrain B</i> (Sub-Urban) 800 – 1500 meter
	<i>Terrain C</i> (Urban) 1500 – 15000 meter
Temperatur Kerja	0°C – 40 °C
Pemancar (UE)	
Tinggi antena UE (m)	1,5 meter
<i>Max UE Power Amplifier</i>	23 dBm
<i>Gain antena UE</i>	0 dBi
Penerima (Node-B)	
Tinggi Antena eNode-B	50 meter
Penguatan antena eNode-B	18 dBi
<i>Noise Figure</i>	2 dB

(Sumber : Harri Holma, 2009)

Perhitungan dilakukan dengan *software* Matlab 7.5.0.342 (R2007b). **Gambar 4.1** adalah gambar pemodelan sistem yang akan dianalisa dalam skripsi ini. Performansi dihitung di sisi BTS (*uplink*). Proses transmisi dimulai dari *user equipment* (UE) menuju BTS melalui RAP dan serat optik seperti pada gambar. Rugi-rugi propagasi dan kanal *noise* AWGN terjadi ketika transmisi dilakukan dari UE ke RAP.



Gambar 4.1 Pemodelan sistem (*Uplink*)
(Sumber: Pemodelan, 2012)

Seperti yang telah diketahui sebelumnya sistem SC-FDMA sendiri memiliki kelebihan dalam hal penggunaan *bandwidth* yang lebih sedikit dengan menjaga *subcarrier* agar tetap *orthogonal*. Tetapi pada sistem ini juga memiliki kelemahan dimana sering terjadinya *intersymbol interference* (ISI). Oleh sebab itu, perlu ditambahkan CP untuk mengatasinya.

Sesuai dengan standar 3GPP *release 8*, Teknik *multiple access* SC-FDMA pada LTE proses penranmsian data di kanal *uplink* dikirimkan dalam struktur *frame* yang di dalamnya terdiri atas alokasi *resource block* dengan jumlah *subcarrier* yang berbeda untuk symbol-simbol SC-FDMA tergantung pada kanal *bandwidth* yang digunakan (1,4MHz, 3Mhz, 5Mhz, 10Mhz, 15Mhz dan 20Mhz). Dan seperti yang sudah dijelaskan pada Bab III skripsi ini menggunakan kanal 10Mhz dalam perhitungannya. **Tabel 4.2** menjelaskan karakteristik untuk masing-masing α_{cp} bandwidth :

Tabel 4.2 Karakteristik LTE pada Kanal *Bandwidth* 10Mhz

Kanal <i>Bandwidth</i>	10MHz
------------------------	-------



<i>Subframe</i> (TTI) (ms)	1
<i>Number of Resource Block</i>	50
<i>Number of Subcarrier</i>	600
IDFT (Tx)/DFT (Rx) size	1024
<i>Symbol per resource block</i>	7 simbol untuk normal CP dan 6 simbol untuk long CP
<i>Cyclic Prefix</i>	5,21 μ s untuk normal CP dan 16,67 μ s untuk long CP

(Sumber: Harri Holma, 2007)

Seperti yang sudah dijabarkan pada Bab II dan III yang membedakan dari ketiga jenis modulasi yang digunakan adalah jumlah bit/symbol yang ditransmisikan serta jumlah kemungkinan sinyalnya. Untuk modulasi QPSK, mentransmisikan 2 bit/symbol dengan 4 kemungkinan sinyal, 16-QAM mentransmisikan 4 bit/symbol dengan 16 kemungkinan sinyal, dan 64-QAM mentransmisikan 6 bit/symbol dengan 64 kemungkinan sinyal. Untuk mengetahui besar parameter performansi, perhitungan pertama yang dilakukan adalah mencari nilai *bandwidth* sistem. Dimana untuk mendapatkan nilai *bandwidth* system tersebut harus menempuh beberapa langkah terlebih dahulu diantaranya melakukan perhitungan laju data, laju untuk tiap *subcarrier* kanal *bandwidth* yang sudah dipilih, besar durasi simbol, nilai *bandwidth* masing-masing *subcarrier* dan setelah itu nilai *bandwidth* sistem bias didapatkan. Setelah nilai *bandwidth* sistem ini didapatkan, maka perhitungan parameter-performansi SC-FDMA pada teknologi RoF dapat dilakukan. Untuk mempermudah dalam memahami semua runtutan langkah dalam perhitungan di atas data akan disajikan dalam bentuk tabel dengan nilai yang didapatkan dengan menggunakan bantuan *software* Matlab 7.5.0.342 (R2007b).

Dalam skripsi ini diasumsikan menggunakan 6 simbol per 1 ms *subframe* dengan panjang CP yang digunakan divariasikan menjadi dua jenis, yaitu durasi CP bernilai normal dengan durasi 5,21 μ s (7,29%) dan *extended* CP dengan durasi 16,67 μ s (20%). Pada perhitungan laju data, besarnya kanal *bandwidth* yang digunakan turut disertakan untuk mengetahui jumlah *subcarrier* pada masing-masing kanal *bandwidth*. Dan kanal *bandwidth* yang dipilih dalam skripsi ini adalah kanal 10Mhz. (ditunjukkan pada **Tabel 4.2**)

Berikut ini adalah langkah-langkah pencarian nilai *bandwidth* sistem yang didapatkan dari beberapa langkah yaitu menghitung laju data, laju data tiap *subcarrier*, durasi simbol tiap *subcarrier*, durasi *subcarrier*, *bandwidth* tiap *subcarrier* dan selanjutnya didapatkan nilai *bandwidth* system dari dua jenis CP yang berbeda.

4.1 Menghitung bandwidth sistem SC-FDMA pada kanal 10 Mhz sisi uplink LTE dengan CP yang berbeda

Untuk perhitungan laju data yang pertama adalah dengan menggunakan teknik modulasi QPSK membawa 2 bit/symbol, pada kanal 10Mhz (sudah ditentukan sebelumnya) diperoleh jumlah subcarrier 600, maka perhitungan laju data/peak bit rate dinyatakan dengan Persamaan:

$$Peak\ bit\ rates = \frac{bit\ per\ symbol}{Hz} \times N \times \frac{jumlah\ simbol\ persub\ frame}{1\ ms} \times (1 - \alpha_{CP}) Kbps$$

Normal CP : $Peak\ bit\ rates = \frac{2}{Hz} \times 600 \times \frac{6}{1\ ms} \times (1 - 0,0729) = 6,68\ Mbps$

Extended CP : $Peak\ bit\ rates = \frac{2}{Hz} \times 600 \times \frac{6}{1\ ms} \times (1 - 0,2) = 5,76\ Mbps$

Dimana α_{CP} adalah faktor cyclic prefix.

Dengan cara yang sama pada teknik modulasi yang berbeda yaitu 16-QAM dan 64-QAM didapatkan nilai laju data pada **Tabel 4.3** :

Tabel 4.3 Peak bit rate dengan kanal bandwidth 10 Mhz

T. Modulasi	α_{CP}	0,0729	0,2
	Peak bit rate (Mbps)		
QPSK		6,68	5,76
16-QAM		13,35	11,52
64-QAM		20,03	17,28

(Sumber: Perhitungan, 2012)



Berdasarkan hasil perhitungan analisis laju data pada kanal 10 Mhz, dapat diketahui bahwa :

- a. Nilai CP dari dua jenis yang berbeda mempengaruhi laju data pada kanal *uplink* LTE dimana laju data saat menggunakan normal CP lebih besar dibandingkan saat menggunakan *extended* CP.
- b. Besarnya laju data
- c. Banyaknya *subcarrier*
- d. Laju data tertinggi

Pada sistem SC-FDMA, laju data yang tinggi akan dibagi ke dalam beberapa *subcarrier* untuk kemudian dialirkan secara paralel dengan nilai laju data yang lebih rendah. Perhitungan di bawah ini adalah perhitungan laju data pada tiap *subcarrier* yang pertama yaitu dengan teknik modulasi QPSK, nilai *peak bit rates* (laju data) pada kanal 10 Mhz sebesar 6,68 Mbps saat faktor CP = 0.0729, dengan jumlah *subcarrier* 600, maka diperoleh laju data untuk masing–masing *subcarrier* yang dihitung menggunakan persamaan 2.3 sebesar :

$$R_{sub} = \frac{R_{tot}}{N}$$

$$R_{sub} = \frac{6,68 \text{ Mbps}}{600} = 0,0111 \text{ Mbps}$$

Dengan menggunakan cara yang sama, dapat diperoleh nilai laju data pada tiap *subcarrier* pada kanal *bandwidth* 10 Mhz dengan teknik modulasi QPSK, 16-QAM dan 64-QAM serta panjang faktor CP normal 0,729 dan CP *extended* 0,2. **Tabel 4.4** menunjukkan hasil analisisnya :

Tabel 4.4 *Peak bit rate* pada tiap *subcarrier* dengan kanal *bandwidth* 10 Mhz

	α_{CP}	0,0729	0,2
T. Modulasi		Rsub(Mbps)	
QPSK		0,0111	0,0096
16-QAM		0,0223	0,0192
64-QAM		0,0334	0,0288

(Sumber : Perhitungan, 2012)

Setelah didapatkan nilai laju data pada tiap *subcarrier*, dapat segera menghitung besarnya durasi simbol untuk suatu modulasi pada masing-masing *subcarrier*. Sesuai dengan persamaan 2.4, maka besar durasi simbol untuk suatu modulasi pada masing-masing *subcarrier* di kanal *bandwidth* 10 Mhz dengan jumlah *subcarrier* 600 dan panjang faktor CP 0,0729 adalah :

$$T_{sub} = \frac{\text{Log}_2 \cdot M}{R_{sub}}$$

$$T_{sub} = \frac{\text{Log}_2 \cdot (4)}{0,0111252 \text{ Mbps}} = 179,7753 \mu\text{s}$$

Dengan R_{sub} adalah laju data tiap *subcarrier* dan M adalah jumlah kemungkinan sinyal pada teknik modulasi (QPSK).

Dengan cara yang sama, didapatkan nilai durasi simbol untuk modulasi QPSK, 16-QAM dan 64-QAM pada kanal *bandwidth* 10 Mhz dimana panjang faktor CP yang digunakan yaitu 0,0729 dan 0,2. Hasil analisisnya ditunjukkan oleh Tabel 4.5 :

Tabel 4.5 Durasi simbol pada tiap *subcarrier* dengan kanal *bandwidth* 10 Mhz

α_{CP}	0,0729	0,2
T. Modulasi	$T_{sub} (\mu\text{s})$	
QPSK	179,7753	208,3333
16-QAM	358,7444	416,6666
64-QAM	958,0838	1111,1111

(Sumber : Perhitungan, 2012)



Dalam skripsi ini, durasi CP divariasikan menjadi dua jenis, yaitu normal CP sebesar 5,21 μ s (7,29%) dan *extended* CP sebesar 16,67 μ s (20%). Durasi simbol SC-FDMA setelah penambahan CP untuk masing-masing *subcarrier* adalah :

$$T_s = T_{sub} + T_{CP}$$

$$T_s = 179,7753 \times 10^{-6} + \left(\frac{7,29}{100} \times 179,7753 \times 10^{-6}\right) = 192,8809 \mu s$$

Dengan cara yang sama diperoleh nilai durasi simbol SC-FDMA setelah ditambahkan CP untuk masing-masing *subcarrier* pada kanal *bandwidth* 10 Mhz untuk teknik modulasi QPSK, 16-QAM serta 64-QAM dan hasil analisis ditampilkan pada Tabel 4.6 :

Tabel 4.6 Durasi *subcarrier* dengan kanal *bandwidth* 10 Mhz

α_{CP}	0,0729	0,2
T. Modulasi	$T_s(\mu s)$	
QPSK	192,8809	249,9999
16-QAM	384,8969	499.9999
64-QAM	1027.9281	1333.3333

(Sumber : Perhitungan, 2012)

Setelah didapatkan durasi simbol SC-FDMA (T_s), nilai ini digunakan untuk mengetahui *bandwidth* untuk masing-masing *subcarrier*. *Bandwidth subcarrier* untuk durasi simbol SC-FDMA pada kanal 10 Mhz dengan teknik modulasi QPSK dan panjang factor CP 0,0729 serta $T_s = 192,8809 \mu s$ adalah :

$$\Delta f = \frac{1}{T_s}$$

$$\Delta f = \frac{1}{192,8809 \cdot 10^{-6}} = 5,18455 \text{ KHz}$$

Dengan cara yang sama didapatkan nilai *bandwidth subcarrier* untuk durasi symbol yang lain. Hasil analisis ditampilkan pada **Tabel 4.7** :

Tabel 4.7 *Bandwidth* pada tiap *subcarrier* dengan kanal 10 Mhz

α_{CP}	0,0729	0,2
T. Modulasi	Δf (Khz)	

QPSK	5,18455	4,00000
16-QAM	2,60416	2,00000
64-QAM	0,97283	0,75000

(Sumber : Perhitungan, 2012)

Sesuai dengan Persamaan 2.2 pada Bab II, maka pada teknik modulasi QPSK dengan kanal *bandwidth* 10 Mhz dan jumlah *subcarrier* 600 dengan faktor CP 0,0729, besar *bandwidth* sistem adalah :

$$B_{sistem} = \frac{R_{tot} [2 \cdot (1 - \alpha_{CP}) + N - 1]}{(1 - \alpha_{CP}) \cdot N \cdot \text{Log}_2(M)}$$

$$B_{sistem} = \frac{6,675 [2 \cdot [(1 - 0,0729) + 600 - 1]]}{(1 - 0,0729) \cdot 600 \cdot \text{Log}_2(4)} \text{ MHz}$$

$$B_{sistem} = 3,6051 \text{ MHz}$$

Dengan cara yang sama, diperoleh nilai *bandwidth* sistem untuk kanal *bandwidth* 10 Mhz dengan panjang CP = 0,0729 untuk normal CP, dan CP = 0,2 untuk *extended* CP, dengan tiga jenis teknik modulasi yaitu QPSK, 16-QAM dan 64-QAM. Hasil analisisnya ditampilkan pada **Tabel 4.8** :

Tabel 4.8 *Bandwidth* sistem pada kanal *bandwidth* 10 Mhz

T. Modulasi	α_{CP}	
	0,0729	0,2
	$B_{sistem}(\text{Mhz})$	
QPSK	3,6051	3,6036
16-QAM	1,8025	1,8018
64-QAM	0.6761	0.6756

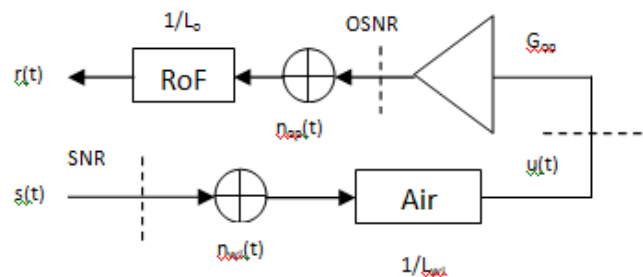
(Sumber : Perhitungan, 2012)



4.2 Analisis *Signal to Noise Ratio* (SNR) Teknologi *Radio over Fiber* (RoF) pada Sistem SC-FDMA

Pada sub bab ini akan dibahas salah satu parameter yang diamati Performansi SC-FDMA pada teknologi RoF yaitu *Signal to Noise Ratio* (SNR).

Pada aplikasi sistem SC-FDMA pada teknologi *Radio over Fiber* (RoF) terdapat beberapa proses dan rugi-rugi yang mempengaruhinya. Hal ini dapat dilihat dalam **Gambar 4.2** :



Gambar 4.2 B

da RoF

Gambar 4.2 menggambarkan proses jalannya sinyal RoF yang mengalami *losses*, penguatan, maupun *noise*. $s(t)$ adalah sinyal RF yang dikirimkan oleh *mobile station user* menuju *radio access unit* (RAU). Pertama-tama sinyal dikirimkan dari *mobile phone* pengguna menuju RAU. Sinyal ini mengalami *losses* propagasi, yaitu L_{wl} dan mengalami *noise* transmisi, n_{wl} yang berupa AWGN. $u(t)$ adalah sinyal yang dipancarkan dari antena menuju BTS. Selanjutnya sinyal dari RAU sebelum dipancarkan melalui optik dikuatkan dahulu oleh G_{op} supaya level dayanya sama dengan level daya yang dibutuhkan antena. Ketika sinyal dilewatkan ke saluran optik (blok RoF), sinyal ini mengalami *losses* sebesar L_{op} dan *noise* transmisi n_{op} . Level daya sinyal keluaran optik dengan *noise* dihitung sebagai *Optical Signal to Noise Ratio* (OSNR). $r(t)$ adalah sinyal yang diterima oleh BTS. SNR dihitung di sisi penerima (BTS) dengan pemodelan sistem berdasarkan propagasinya. Perbandingan sinyal yang diterima di sisi penerima dengan *noise* dan rugi-rugi total di seluruh sistem adalah SNR. Sinyal $r(t)$ terdiri dari dua komponen, yaitu sinyal $s(t)$ dan *noise* total $n(t)$.

$$r(t) = D \cdot s(t) + n(t) \quad (4.1)$$

Fernando, 2004, menyatakan bahwa:

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

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

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_{el} = noise wireless (AWGN)

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

$$E[r^2(t)] = E[r_s^2(t)] + E[r_n^2(t)] \quad (4.2)$$

Dari substitusi antara persamaan (4.1) dengan persamaan (4.2) didapatkan:

$$E[r_s^2(t)] = m^2 I_D^2 10^{-L_{op}/10} \left(\frac{G_{op}}{L_{el}}\right)^2 E[s^2(t)] \quad (4.3)$$

$$E[r_n^2(t)] = \left(\frac{G_{op}}{L_{el}}\right)^2 E[n_{op}^2(t)] + E[n_{el}^2(t)] \quad (4.4)$$

$$\begin{aligned} SNR &= \frac{E[r_s^2(t)]}{E[r_n^2(t)]} \\ SNR &= \frac{m^2 I_D^2 10^{-\frac{L_{op}}{10}} \left(\frac{G_{op}}{L_{el}}\right)^2 E[s^2(t)]}{\left(\frac{G_{op}}{L_{el}}\right)^2 E[n_{op}^2(t)] + E[n_{el}^2(t)]} \\ SNR &= \frac{m^2 I_D^2 10^{-L_{op}/10} E[s^2(t)]}{E[n_{op}^2(t)] + \left(E[n_{el}^2(t)] \left(\frac{L_{el}}{G_{op}}\right)^2\right)} \end{aligned} \quad (4.5)$$

$$SNR = \frac{m^2 I_D^2 10^{-2(n_{cl}c + n_{sl}s + \alpha L)/10} P_{RFin}}{\left(\langle I_{shot}^2 \rangle + \langle I_{RIN}^2 \rangle + \langle I_{th}^2 \rangle\right) + \left(10^{-(10 \log_{10}(kT) + 10 \log_{10}(B) + NF)/10} \left(\frac{L_{el}}{G_{op}}\right)^2\right)}$$

Pada analisis SNR akan digunakan spesifikasi LTE untuk Model Propagasi Okumura-Hata seperti pada **Tabel 4.1**. Selain spesifikasi *mobile* LTE, digunakan juga spesifikasi RoF pada **Tabel 4.9**:

Tabel 4.9 Spesifikasi Teknologi *Radio over Fiber*

Parameter	Nilai
Suhu Referensi (T)	300 K
Rise time transmitter ($\Delta\tau_{\text{source}}$)	16 psec
Rise time receiver ($\Delta\tau_{\text{receiver}}$)	24 psec
RIN (Relative Intensity Noise)	-155 dB/Hz
Panjang gelombang (λ)	$1 \text{ mm} \leq \lambda \leq 1.5 \text{ mm}$
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 (ρ)	0.75 mA/mW

(Sumber :Abd El-Naser A. Mohamed, 2011)

Karena nilai *bandwidth* sistem yang akan digunakan untuk menghitung parameter SNR sudah didapatkan dari perhitungan sub-bab sebelumnya dan ditampilkan pada **Tabel 4.7**, selanjutnya kita mengkalkulasi nilai dari rugi-rugi atau *noise* yang terjadi dalam sistem RoF ini.

Dari spesifikasi pada **Tabel 4.7** tersebut, maka dapat ditentukan beberapa parameter penting untuk menganalisis SNR antara lain:

- Frekuensi kerja yang digunakan pada LTE, yaitu 2600 MHz.
- Temperatur operasi pada LTE adalah $0^\circ\text{C} - 40^\circ\text{C}$ tetapi pada analisis ini digunakan temperatur ruangan sebesar 30°C atau sama dengan 300°K .
- Daya output pada pemancar *User Equipment* (UE) sebesar 23 dBm.
- Penguatan pada antenna UE adalah 0 dBi.
- Penguatan pada antenna eNode-B adalah 2 dBi.
- UE berada pada area *suburban indoor (terrain-B)* dan dalam keadaan diam.

Perhitungan *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) dilakukan pada kanal nirkabel dan kanal optik. Perhitungan kanal nirkabel/*wireless* dengan menggunakan model kanal *noise* AWGN. Untuk menganalisis SNR, diperlukan perhitungan rugi-rugi propagasi NLOS. Untuk mengetahui besarnya rugi-rugi propagasi NLOS (*PL*) maka diperlukan parameter jarak jangkauan antara *transmitter* dan *receiver* (*d*), seperti yang ditunjukkan pada **Tabel 4.10**

Tabel 4.10 LTE Operating Range (Sub-Urban)

Modulation	Tipe Terrain	Operating	Jarak yang akan
------------	--------------	-----------	-----------------

		Range (m)	dianalisis (m)
QPSK	B	1260-1500	1400
16-QAM		1030-1260	1150
64-QAM		800-1030	900

(Sumber: Harri Holma, 2009)

Rugi-rugi propagasi NLOS dengan jarak pemancar dan penerima (d) = 1400 meter (*terrain-B*) dengan modulasi QPSK, pada frekuensi operasi LTE 2600 MHz, dapat diperoleh dengan menggunakan Persamaan (2.7), sebesar:

$$PL = A + 10 \cdot \gamma \cdot \text{Log}_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + s + \Delta PL_f + \Delta PL_h$$

$$PL = 20 \text{Log}_{10} \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot f \cdot d_0}{c} \right) + 10 \cdot \left[a - b \cdot h_b + \frac{c}{h_b} \right] \cdot \text{Log}_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + s$$

$$+ 6 \text{Log}_{10} \left(\frac{f}{2000} \right) + \left[-10,8 \text{Log}_{10} \left(\frac{h_{ue}}{2} \right) \right]$$

$$PL = 20 \text{Log}_{10} \left(\frac{4\pi \times 2,6 \times 10^9 \times 100}{3 \times 10^8} \right) + 10 \times \left[4 - 0,0065 \times 1,5 + \frac{17,1}{1,5} \right]$$

$$\times \text{Log}_{10} \left(\frac{1400}{100} \right) + 9,6 + 6 \text{Log}_{10} \left(\frac{2,6 \times 10^9}{2000} \right) + \left[-10,8 \text{Log}_{10} \left(\frac{50}{2} \right) \right]$$

$$PL = 133,4957 \text{ dB}$$

Sedangkan nilai rugi-rugi propagasi NLOS dengan dua modulasi lainnya yaitu 16-QAM dan 64-QAM dimana jarak pemancar dan penerima yang dianalisis adalah 1400m dan 1150m (Harri Holma, 2009) ditampilkan dalam **Tabel 4.11** :

Tabel 4.11 Hasil Analisis Rugi-Rugi Propagasi NLOS

Modulation	Tipe Terrain	Jarak yang akan dianalisis (m)	PL (dB)
QPSK	B	1400	133,4957
16-QAM		1150	130,0640
64-QAM		900	125,7877

Perhitungan Noise AWGN pada kanal *bandwidth* 10 Mhz, dengan menggunakan teknik modulasi QPSK dengan jumlah *subcarrier* 600 dan *bandwidth* sistem sebesar 3,6051 Mhz saat CP normal sebesar 0,0729 adalah sebagai berikut :

$$[n_{el}^2(t)] = 10 \log_{10}(k T) + 10 \log_{10}(B) + NF$$

$$[n_{el}^2(t)] = 10 \log_{10}(1.38 \times 10^{-23} \times 300) + 10 \log_{10}(3,6051 \times 10^6) + 2$$

$$[n_{el}^2(t)] = -136,26 \text{ dBm}$$

Dengan menggunakan cara yang sama **Tabel 4.12** menampilkan hasil perhitungan *noise* AWGN pada kanal *bandwidth* 10 Mhz dengan teknik modulasi 16-QAM dan 64-QAM dengan CP yang berbeda pula.

Tabel 4.12 *Noise* AWGN pada kanal *bandwidth* 10 Mhz

α_{CP}	0,0729	0,2
T. Modulasi	<i>Noise</i> AWGN(dBm)	
QPSK	-136,2610	-136,2626
16-QAM	-139,2712	-139,2729
64-QAM	-143,5299	-143,5331

Nilai *noise* total yang terjadi pada kanal optik bergantung pada 3 jenis *noise*, yaitu *shot noise*, *thermal noise*, dan *relative intensity noise* (RIN).

Shot noise merupakan rugi-rugi yang terjadi akibat adanya adanya foton yang bergerak, nilainya dihitung melalui persamaan (2.8) :

$$\langle I_{shot}^2 \rangle = 2qI_D B$$

I_D adalah arus yang terdeteksi oleh *receiver*, besarnya ditentukan oleh daya masukan RF, daya rata-rata laser, serta sensitivitas detektor, yaitu:

$$I_D = \Re P(t)$$

$$I_D = \Re [1 + ms(t)] P_0$$

$$s(t) = \sqrt{2 P_{RF,in}}$$

Untuk $P_0 = 0,3 \text{ W}$, $m = 0,7$, $\Re = 0,75 \text{ mA/mW}$, dan $P_{RF,in} = 35 \text{ dBm}$, maka:

$$I_D = 0,75 \left[1 + 0,7 \sqrt{2 \times \left(10^{\frac{35}{10}} / 1000 \right)} \right] 0,3$$

$$I_D = 0,5051 \text{ A}$$

Bandwidth yang digunakan dalam analisis SNR adalah *bandwidth* sinyal RF, yaitu *bandwidth*SC-FDMA pada LTE kanal *bandwidth* yang telah ditentukan yaitu 10 MHz. Untuk panjang serat optik 10 km dengan modulasi QPSK dan CP normal 0.0729, maka:

$$\begin{aligned} \langle I_{shot}^2 \rangle &= 2qI_D B \\ \langle I_{shot}^2 \rangle &= 2 \times 1,6 \times 10^{-19} \times 0,5051 \times 3,6051 \times 10^6 \\ \langle I_{shot}^2 \rangle &= 5,827 \times 10^{-13} \text{ (A}^2\text{)} \end{aligned}$$

Pada teknik modulasi 16-QAM dan 64-QAM dengan jenis CP yang dibedakan antara normal dan *extended* ditampilkan nilai *Shot noise* pada **Tabel 4.13** :

Tabel 4.13 *Shot noise* pada kanal *bandwidth* 10 Mhz

α_{CP}	0,0729	0,2
T. Modulasi	$I_{shot}^2 \text{ (A}^2\text{)}$	
QPSK	$5,827 \times 10^{-13}$	$5,825 \times 10^{-13}$
16-QAM	$2,913 \times 10^{-13}$	$2,912 \times 10^{-13}$
64-QAM	$1,092 \times 10^{-13}$	$1,091 \times 10^{-13}$

Thermal noise merupakan rugi-rugi yang terjadi akibat munculnya panas di dalam saluran, nilainya dihitung melalui persamaan (2.9). Untuk panjang serat optik diasumsikan 50km dengan alasan memilih nilai tersebut sebagai jarak minimal daerah cakupan RoF, pada teknik modulasi QPSK dengan CP normal sebesar 0,0729 dan kanal *bandwidth* 10 Mhz maka:

$$\begin{aligned} \langle I_{th}^2 \rangle &= \frac{4 k T B}{R_L} \\ \langle I_{th}^2 \rangle &= \frac{4 \times 1,38 \times 10^{-23} \times 300 \times 3,6051 \times 10^6}{50} \\ \langle I_{th}^2 \rangle &= 1,194 \times 10^{-15} \text{ (A}^2\text{)} \end{aligned}$$

Untuk nilai *thermal noise* pada teknik modulasi lainnya dengan CP yang dibedakan pula ditampilkan dalam **Tabel 4.14**:

Tabel 4.14 *Thermal noise* pada kanal *bandwidth* 10 Mhz

α_{CP}	0,0729	0,2
T. Modulasi	$I_{th}^2 \text{ (A}^2\text{)}$	
QPSK	$1,194 \times 10^{-15}$	$1,193 \times 10^{-15}$
16-QAM	$5,970 \times 10^{-16}$	$5,968 \times 10^{-16}$
64-QAM	$2,239 \times 10^{-16}$	2.237×10^{-16}



RIN merupakan rugi-rugi yang diakibatkan ketidaklinieran laser, nilainya dihitung melalui persamaan (2.6). Untuk koefisien $RIN = -155$ dB/Hz, dan panjang serat optik 50 km pada teknik modulasi QPSK dan CP normal 0,0729, maka:

$$\langle I_{RIN}^2 \rangle = \sqrt{P_{RIN} \times I_D^2 \times B}$$

$$P_{RIN} (A^2/Hz) = 10^{\frac{P_{RIN} (dB^2/Hz)}{10}}$$

$$P_{RIN} (A^2/Hz) = 10^{\frac{-155}{10}} = 3,1623 \times 10^{-16}$$

$$\langle I_{RIN}^2 \rangle = \sqrt{3,1623 \times 10^{-16} \times 0,8465^2 \times 3,6051 \times 10^6}$$

$$\langle I_{RIN}^2 \rangle = 2,858 \times 10^{-5} (A^2)$$

Nilai RIN pada dua modulasi lain disertai CP yang dibedakan antara normal dan *extended* ditampilkan pada **Tabel 4.15**:

Tabel 4.15 RIN pada kanal *bandwidth* 10 Mhz

α_{CP}	0,0729	0,2
T. Modulasi	$I_{RIN}^2(A^2)$	
QPSK	$2,858 \times 10^{-5}$	$2,857 \times 10^{-5}$
16-QAM	$2,021 \times 10^{-5}$	$2,020 \times 10^{-5}$
64-QAM	$1,238 \times 10^{-5}$	$1,237 \times 10^{-5}$

Total *noise* dalam saluran optik dimana nilai *bandwidth* sistem sebesar 3,6051 Mhz dengan menggunakan teknik modulasi QPSK, CP normal 0,0729 dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.10 berikut ini :

$$[n_{op}^2(t)] = \langle I_{shot}^2 \rangle + \langle I_{th}^2 \rangle + \langle I_{RIN}^2 \rangle$$

$$[n_{op}^2(t)] = 5,827 \times 10^{-13} + 1,194 \times 10^{-15} + 2,858 \times 10^{-5}$$

$$[n_{op}^2(t)] = 2,858 \times 10^{-5} A^2$$

Untuk nilai total *noise* pada teknik modulasi lainnya dengan CP yang dibedakan antara normal dan *extended* ditampilkan dalam **Tabel 4.16** :



Tabel 4.16 Total noise pada kanal bandwidth 10 Mhz

α_{CP}	0,0729	0,2
T. Modulasi	$n_{op}^2(t) (A^2)$	
QPSK	$2,858 \times 10^{-5}$	$2,857 \times 10^{-5}$
16-QAM	$2,021 \times 10^{-5}$	$2,020 \times 10^{-5}$
64-QAM	$1,238 \times 10^{-5}$	$1,237 \times 10^{-5}$

Selain noise tersebut, terdapat rugi-rugi optik di sepanjang saluran transmisi. Rugi-rugi optik dinyatakan dengan (2.7):

$$L_{op} = 2(n_c l_c + n_s l_s + \alpha L)$$

Jumlah konektor untuk saluran tanpa penguat adalah 2, dengan koefisien rugi-rugi konektornya adalah 0,5 dB, sedangkan jumlah sambungan ditentukan dengan:

$$n_s = \frac{\text{panjangsaluran}}{\text{panjangkabeltiaprol}} - 1$$

$$n_s = \frac{50}{5} - 1 = 9$$

Untuk panjang kabel tiap rol = 5 km, maka jumlah sambungan untuk panjang saluran 50 km adalah 9 buah. Koefisien rugi-rugi sambungan adalah 0,5 dB. Koefisien redaman bergantung pada panjang gelombang yang digunakan. Berdasarkan *datasheet product* dari CORNING, nilai yang dipakai adalah untuk $\lambda = 1550$ nm, $\alpha = 0,2$ dB/km, $\lambda = 1490$ nm, $\alpha = 0,24$ dB/km sedangkan untuk $\lambda = 1310$ nm, $\alpha = 0,35$ dB/km.

Untuk $\lambda = 1550$ nm dan panjang saluran optik 50 km nilai *losses* optiknya adalah :

$$L_{op} = 2(2 \times 0,5 + 9 \times 0,5 + 0,2 \times 50)$$

$$L_{op} = 31 \text{ dB}$$

Nilai SNR dapat dihitung melalui persamaan (2.19), yaitu :

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

$$SNR = \frac{0,7^2 \times 0,5051^2 \times 3,162 \times 10^{-\left(\frac{31}{10}\right)}}{2,858 \times 10^{-5} + \left(10^{(-136,26)/10} x \left(\frac{10^{\frac{133,4957}{10}}}{10^{\frac{20}{10}}} \right)^2 \right)}$$



$$SNR = \frac{3,1398 \times 10^{-4}}{2,858 \times 10^{-5}} = 37,7348$$

$$SNR_{sistem} (dB) = 10 \log_{10}(37,7348) = 15,7674 \text{ dB}$$

Perhitungan SNR untuk panjang saluran optik yang telah ditentukan dilakukan dengan cara yang sama pada tiap teknik modulasi yang berbeda dengan CP dan panjang gelombang yang digunakan.

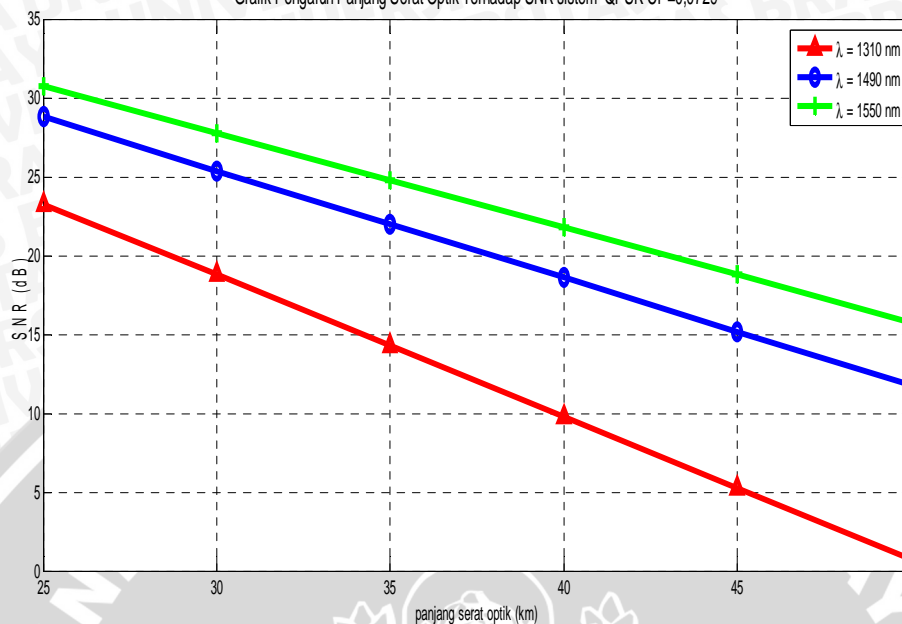
Berikut ini adalah tabel yang menampilkan nilai SNR sistem dari ketiga modulasi yang berbeda:

1. Teknik modulasi QPSK

Tabel 4.17 Hasil Analisis SNR_{sistem} pada Teknik Modulasi QPSK

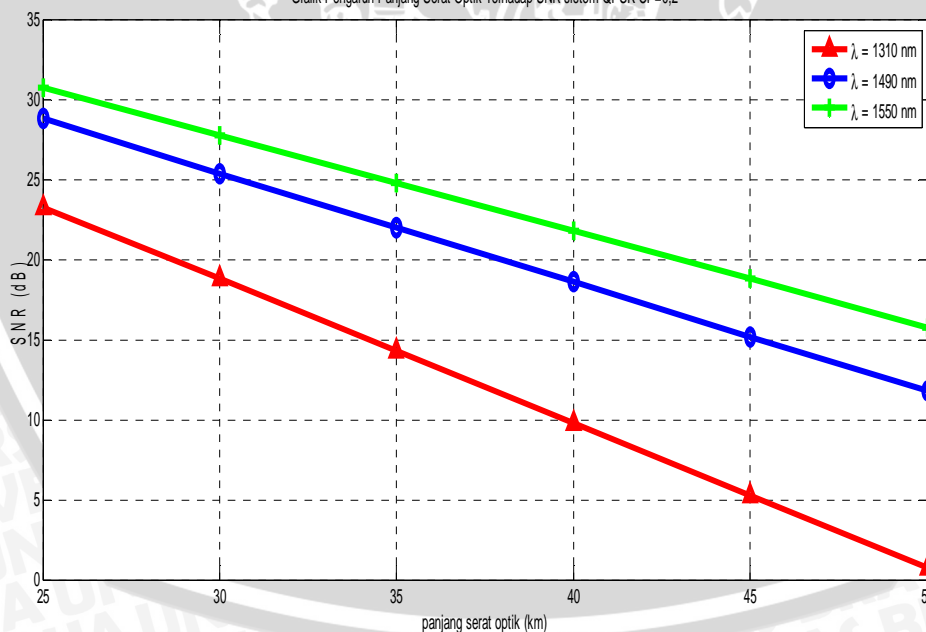
Panjang serat optik (Km)	SNR _{sistem} (dB)					
	CP = 0,0729			CP = 0,2		
	$\lambda=1550\text{nm}$	$\lambda=1490\text{nm}$	$\lambda=1310\text{nm}$	$\lambda=1550\text{nm}$	$\lambda=1490\text{nm}$	$\lambda=1310\text{nm}$
25	30,7674	28,7674	23,2674	30,7683	28,7683	23,2683
30	27,7674	25,3674	18,7674	27,7683	25,3683	18,7683
35	24,7674	21,9674	14,2674	24,7683	21,9683	14,2683
40	21,7674	18,5674	9,7674	21,7683	18,5683	9,7683
45	18,7674	15,1674	5,2674	18,7683	15,1683	5,2683
50	15,7674	11,7674	0,7674	16,7683	11,7683	0,7683

Grafik Pengaruh Panjang Serat Optik Terhadap SNR sistem QPSK CP=0,0729



Gambar 4.3 Grafik Hubungan Antara Panjang Serat Optik dengan SNR_{sistem} pada Teknik Modulasi QPSK dengan CP = 0,0729

Grafik Pengaruh Panjang Serat Optik Terhadap SNR sistem QPSK CP=0,2



Gambar 4.4 Grafik Hubungan Antara Panjang Serat Optik dengan SNR_{sistem} pada Teknik Modulasi QPSK dengan CP = 0,2

Tabel 4.17 adalah hasil perhitungan dan simulasi SNR_{sistem} pada teknik modulasi QPSK. Dilihat nilai tersebut dapat diambil beberapa generalisasi yaitu nilai SNR yang

tertinggi adalah pada CP = 0,2 pada $\lambda = 1550$ nm dan jarak 25 km yaitu sebesar 30,7683 dB. Sedangkan pada CP = 0,0729 pada λ dan jarak yang sama nilai SNRnya adalah 30,7674 dB. Hal ini karena pada CP = 0,2 dalam perhitungannya nilai *bandwidth* sistemnya lebih besar dibandingkan CP = 0,0729 sehingga nilai SNR juga semakin baik.

Pada CP = 0,2 dengan jarak 25 km nilai SNR pada $\lambda = 1550$ nm adalah 30,7683 dB, $\lambda = 1490$ nm adalah 28,7683 dB serta $\lambda = 1310$ nm adalah 23,2684 dB. Hal ini menunjukkan nilai tertinggi SNR terjadi ketika penggunaan $\lambda = 1550$ nm karena nilai atenuasi maksimum (α) pada panjang gelombang ini adalah yang terkecil dibandingkan kedua lainnya. Sehingga rugi-ruginya juga semakin kecil.

Pada CP = 0,2 dengan $\lambda = 1550$ nm pada jarak 25 km nilai SNR adalah 30,7683 dB dan pada jarak 50 km adalah 16,7683 dB. Hasil ini membuktikan bahwa semakin jauh panjang serat optik yang digunakan maka semakin kecil nilai SNRnya karena *losses* yang terjadi semakin besar sesuai dengan persamaan (2.7)

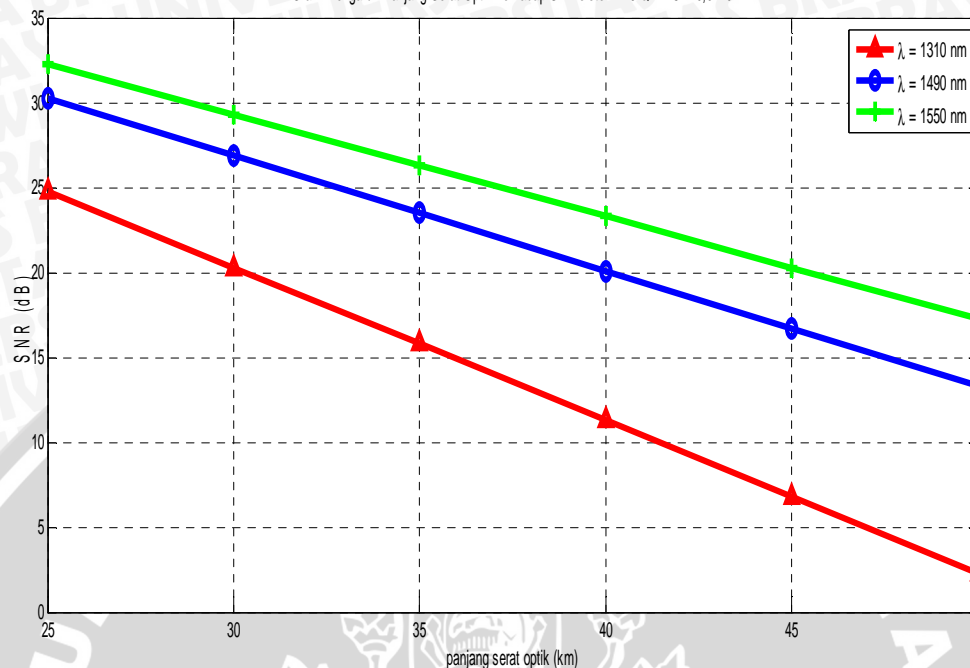
2. Teknik Modulasi 16-QAM

Tabel 4.18 Hasil Analisis SNR_{sistem} pada Teknik Modulasi 16-QAM

Panjang serat optik (Km)	SNR _{sistem} (dB)					
	CP = 0,0729			CP = 0,2		
	$\lambda=1550$ nm	$\lambda=1490$ nm	$\lambda=1310$ nm	$\lambda=1550$ nm	$\lambda=1490$ nm	$\lambda=1310$ nm
25	32,2726	30,2726	24,7726	32,2735	30,2735	24,7735
30	29,2726	26,8726	20,2726	29,2735	26,8735	20,2735
35	26,2726	23,4726	15,7726	26,2735	23,4735	15,7735
40	23,2726	20,0726	11,2726	23,2735	20,0735	11,2735
45	20,2726	16,6726	6,7726	20,2735	16,6735	6,7735
50	17,2726	13,2726	2,2726	17,2735	13,2735	2,2735

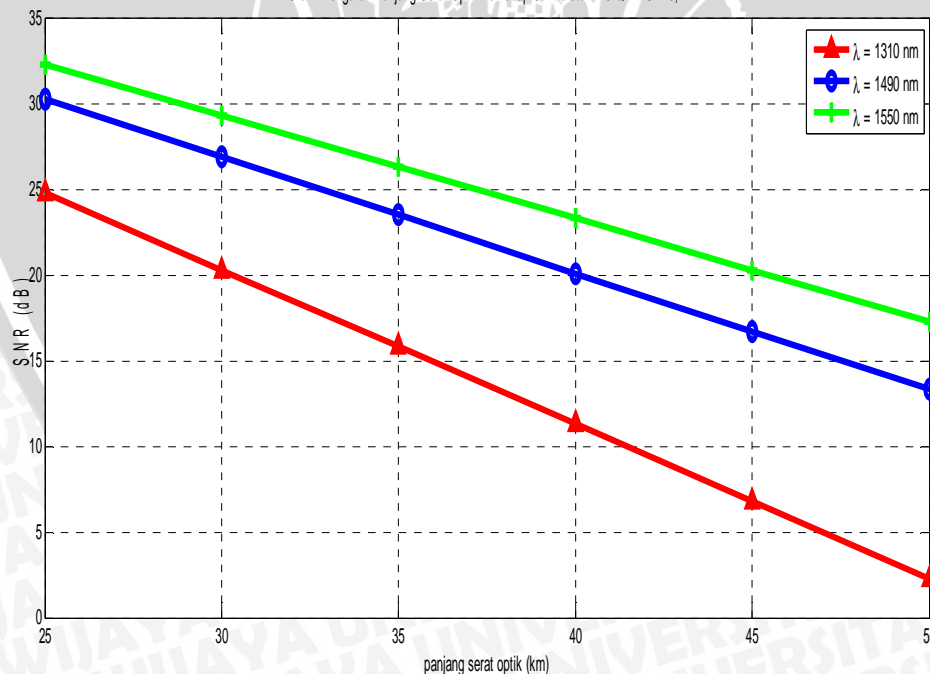


Grafik Pengaruh Panjang Serat Optik Terhadap SNR sistem 16-QAM CP=0,0729



Gambar 4.5 Grafik Hubungan Antara Panjang Serat Optik dengan SNR_{sistem} pada Teknik Modulasi 16-QAM dengan CP = 0,0729

Grafik Pengaruh Panjang Serat Optik Terhadap SNR sistem 16-QAM CP=0,2



Gambar 4.6 Grafik Hubungan Antara Panjang Serat Optik dengan SNR_{sistem} pada Teknik Modulasi 16-QAM dengan CP = 0,2

Seperti pada teknik modulasi sebelumnya **Tabel 4.18** adalah hasil perhitungan dan simulasi SNR_{sistem} pada teknik modulasi 16-QAM. Walaupun selisih nilainya cukup kecil tetapi nilai SNR pada CP = 0,2 pada $\lambda = 1550$ nm dan jarak 25 km yaitu 32,2735 dB lebih besar dibandingkan pada CP = 0,0729 pada λ dan jarak yang sama nilai SNRnya adalah 32,2726 dB. Hal ini karena pada CP = 0,2 dalam perhitungannya nilai *bandwidth* sistemnya lebih besar dibandingkan CP = 0,0729 sehingga nilai SNR juga semakin baik.

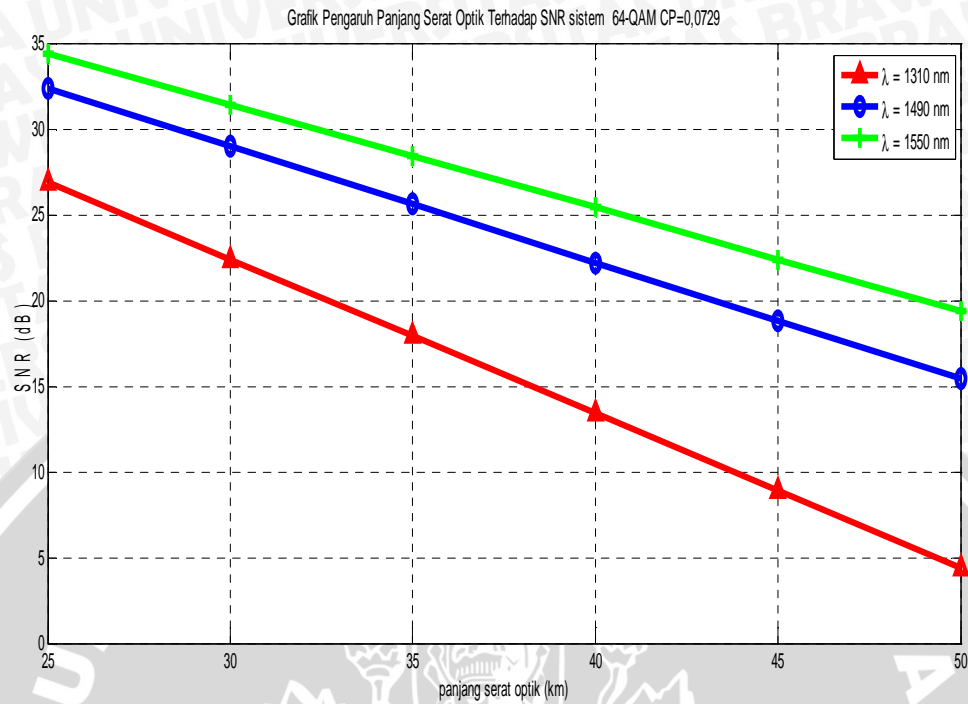
Pada CP = 0,2 dengan jarak 25 km nilai SNR pada $\lambda = 1550$ nm adalah 32,2735 dB, $\lambda = 1490$ nm adalah 30,2735 dB serta $\lambda = 1310$ nm adalah 24,7735 dB. Hal ini menunjukkan nilai tertinggi SNR terjadi ketika penggunaan $\lambda = 1550$ nm karena nilai atenuasi maksimum (α) pada panjang gelombang ini adalah yang terkecil dibandingkan kedua lainnya. Sehingga rugi-ruginya juga semakin kecil.

Pada CP = 0,2 dengan $\lambda = 1550$ nm pada jarak 25 km nilai SNR adalah 32,2735dB dan pada jarak 50 km adalah 17,2735dB. Hasil ini membuktikan bahwa semakin jauh panjang serat optik yang digunakan maka semakin kecil nilai SNRnya karena *losses* yang terjadi semakin besar sesuai dengan persamaan (2.7)

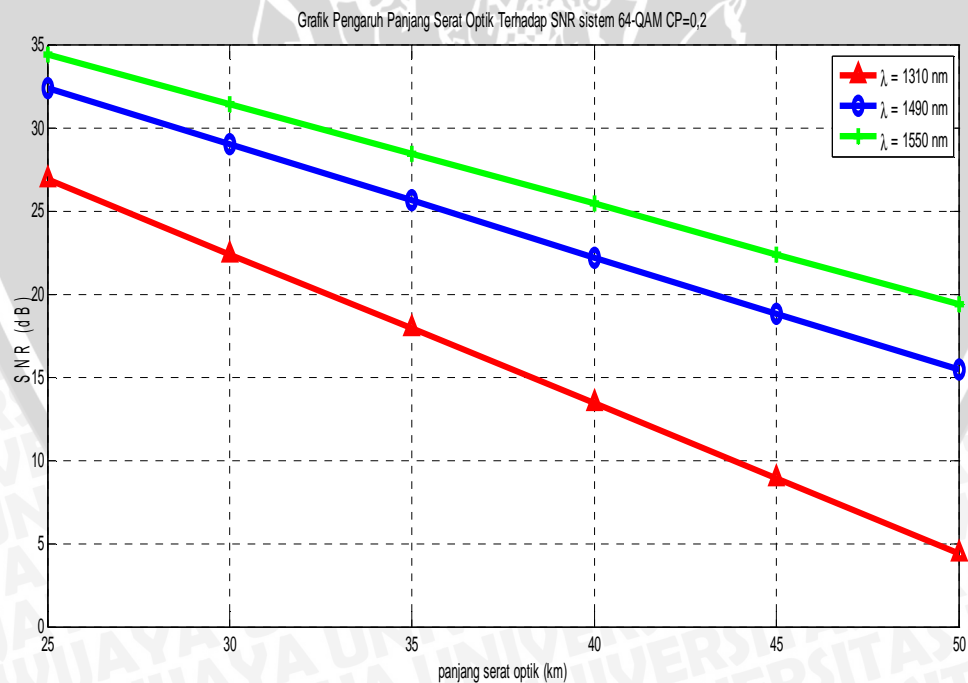
3. Teknik Modulasi 64-QAM

Tabel 4.19 Hasil Analisis SNR_{sistem} pada Teknik Modulasi 64-QAM

Panjang serat optik (Km)	SNR_{sistem} (dB)					
	CP = 0,0729			CP = 0,2		
	$\lambda=1550nm$	$\lambda=1490nm$	$\lambda=1310nm$	$\lambda=1550nm$	$\lambda=1490nm$	$\lambda=1310nm$
25	34,4019	32,4019	26,9019	34,4036	32,4036	26,9036
30	31,4019	29,0019	22,4019	31,4036	29,0036	22,4036
35	28,4019	25,6019	17,9019	28,4036	25,6036	17,9036
40	25,4019	22,2019	13,4019	25,4036	22,2036	13,4036
45	22,4019	18,8019	8,9019	22,4036	18,8036	8,9036
50	19,4019	15,4019	4,4019	19,4036	15,4036	4,4036



Gambar 4.7 Grafik Hubungan Antara Panjang Serat Optik dengan SNR_{system} pada Teknik Modulasi 64-QAM dengan CP = 0,0729



Gambar 4.8 Grafik Hubungan Antara Panjang Serat Optik dengan SNR_{system} pada Teknik Modulasi 64-QAM dengan CP = 0,2

Tabel 4.19 adalah hasil perhitungan dan simulasi SNR_{sistem} pada teknik modulasi 64-QAM. Dilihat nilai tersebut dapat diambil beberapa generalisasi yaitu nilai SNR yang tertinggi adalah pada $CP = 0,2$ pada $\lambda = 1550$ nm dan jarak 25 km yaitu sebesar 34,4036 dB. Sedangkan pada $CP = 0,0729$ pada λ dan jarak yang sama nilai SNRnya adalah 34,4019 dB. Hal ini karena pada $CP = 0,2$ dalam perhitungan nilai *bandwidth* sistemnya lebih besar dibandingkan $CP = 0,0729$ sehingga nilai SNR juga semakin baik.

Pada $CP = 0,2$ dengan jarak 25 km nilai SNR pada $\lambda = 1550$ nm adalah 34,4036 dB, $\lambda = 1490$ nm adalah 32,4036 dB serta $\lambda = 1310$ nm adalah 26,9036 dB. Hal ini menunjukkan nilai tertinggi SNR terjadi ketika penggunaan $\lambda = 1550$ nm karena nilai atenuasi maksimum (α) pada panjang gelombang ini adalah yang terkecil dibandingkan kedua lainnya. Sehingga rugi-ruginya juga semakin kecil.

Pada $CP = 0,2$ dengan $\lambda = 1550$ nm pada jarak 25 km nilai SNR adalah 34,4036 dB dan pada jarak 50 km adalah 17,2735dB. Hasil ini membuktikan bahwa semakin jauh panjang serat optik yang digunakan maka semakin kecil nilai SNRnya karena *losses* yang terjadi semakin besar sesuai dengan persamaan (2.7)

Dari ketiga teknik modulasi yang digunakan, nilai SNR tertinggi ialah pada teknik modulasi 64-QAM yaitu 34,4036 dB di panjang gelombang 1550 nm dan jarak 25 km serta CP yang digunakan adalah 0,2. Sedangkan nilai SNR terendah ialah pada teknik modulasi QPSK yaitu sebesar 0,7674 dB pada jarak 50 km di panjang gelombang 1310 nm dan CP sebesar 0,0729. Tentu saja hal ini sesuai dengan teori pada Bab II yang mengatakan Semakin jauh jarak yang ditempuh maka redaman akan semakin besar dan menurunkan nilai SNR serta menyebabkan laju bit akan semakin rendah, demikian juga sebaliknya, jarak yang dekat akan menghasilkan redaman yang kecil dan meningkatkan SNR serta laju bit akan semakin tinggi.

4.3 Analisis Kapasitas Kanal Saluran Serat Optik Teknologi *Radio over Fiber*(RoF) pada sistem SC-FDMA

Dalam proses perhitungan kapasitas kanal sistem dibutuhkan nilai SNR_{sistem} yang terdapat pada **Tabel 4.17**, **Tabel 4.18** dan **Tabel 4.19**. Selain itu berdasarkan teorema Shannon persamaan (2.22) nilai *bandwidth* sinyal juga dibutuhkan dalam analisis kapasitas

kanal. Maka untuk panjang serat optik 50 km dan panjang gelombang 1550 nm ditentukan dengan :

$$\Delta\tau_{mat} = D_m \times \Delta\lambda \times L$$

$$\Delta\tau_{mat} = 16,33 \times 0,1 \times 50 = 81,65$$

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

$$\Delta\tau_{sistem} = \sqrt{(16)^2 + (25)^2 + (81,65)^2} = 86,88 \text{ psec}$$

$$BW_{sig} = \frac{0,44}{\Delta\tau_{sistem} \times L}$$

$$BW_{sig} = \frac{0,44}{86,88 \times 50} = 0,10 \text{ GHz}$$

Nilai *bandwidth* sinyal untuk berbagai panjang serat optik serta panjang gelombang yang digunakan ditampilkan pada **Tabel 4.20**

Tabel 4.20 Hasil Analisis *Bandwidth* Kanal Optik

Panjang serat optik (km)	<i>Bandwidth</i> sinyal (Ghz)		
	$\lambda=1550\text{nm}$	$\lambda=1490\text{nm}$	$\lambda=1310\text{nm}$
25	0,35	0,40	0,59
30	0,26	0,30	0,49
35	0,20	0,23	0,42
40	0,15	0,19	0,37
45	0,12	0,15	0,33
50	0,10	0,12	0,29

Dari hasil perhitungan *bandwidth* sinyal di tiga panjang gelombang yang berbeda, pada panjang gelombang 1310 nm memiliki nilai lebih besar dibandingkan dua panjang gelombang lainnya. Sedangkan untuk nilai dalam satu panjang gelombang yang sama, semakin panjang serat optik yang digunakan maka semakin kecil pula *bandwidth* sinyalnya.

Sehingga untuk menghitung kapasitas kanal untuk panjang gelombang 1550 nm pada teknik modulasi QPSK dengan panjang serat optik 50 km dan CP = 0,0729 dengan $SNR_{sistem} = 15,7674 \text{ dB}$ adalah sebagai berikut :

$$C = BW_{sig} \log_2(1 + SNR_{sistem})$$

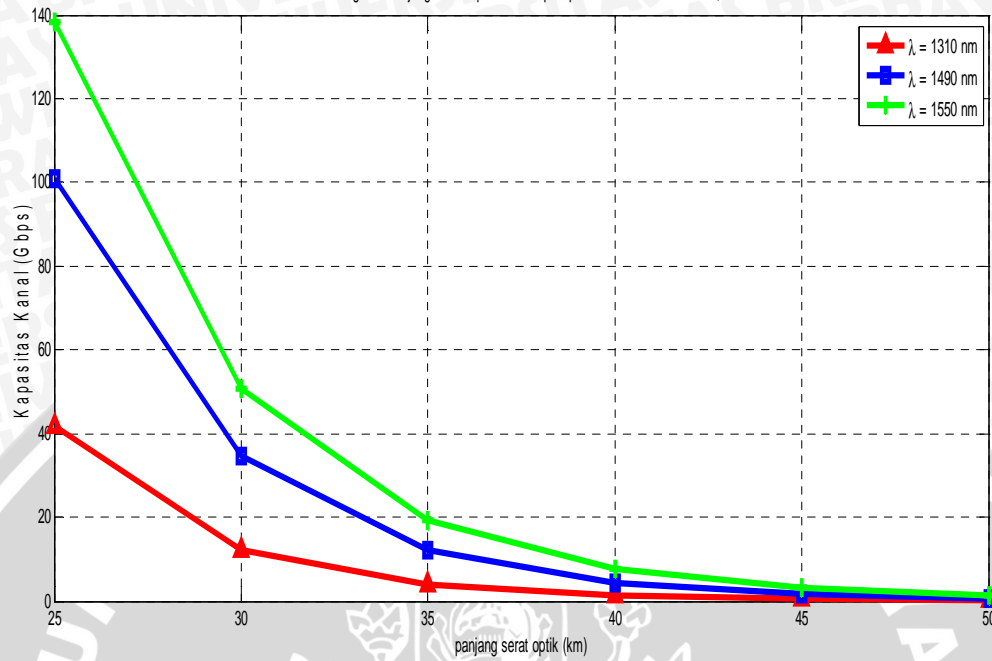
$$C = 0,10 \log_2(1 + 10^{1,57674}) = 0,5344 \text{ Gbps}$$

Dengan cara yang sama, dapat diperoleh nilai kapasitas kanal sistem untuk panjang gelombang 1320 nm, 1490 nm dan 1550 nm dengan panjang serat optik yang berbeda. Hasil analisisnya ditunjukkan pada **Tabel 4.21** dan hubungan kapasitas kanal sistem terhadap panjang serat optik ditampilkan pada **Gambar 4.9**.

Tabel 4.21 Hasil Analisa Kapasitas Kanal Sistem QPSK

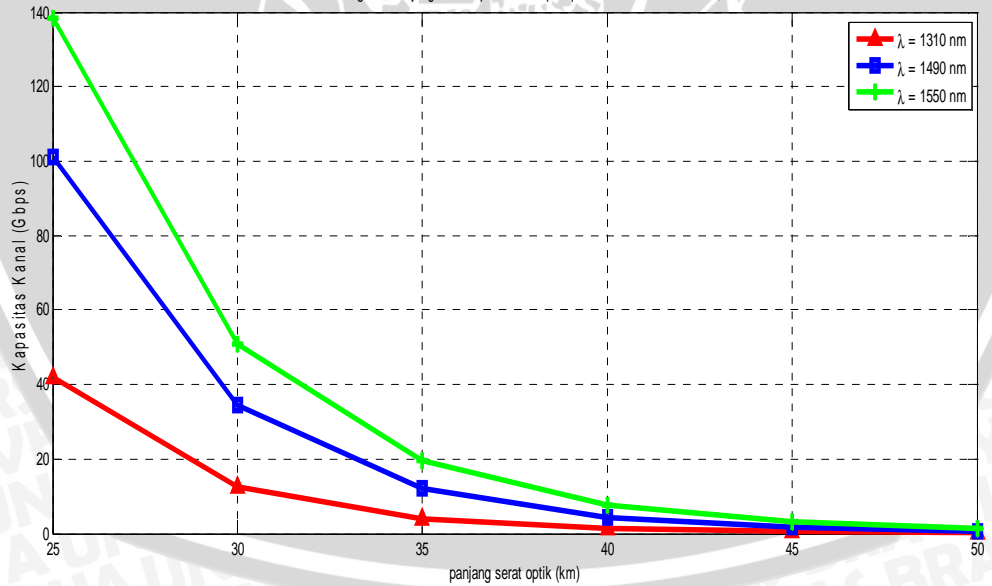
Panjang serat optik (Km)	Kapasitas kanal (Gbps)					
	CP = 0,0729			CP = 0,2		
	$\lambda=1550\text{nm}$	$\lambda=1490\text{nm}$	$\lambda=1310\text{nm}$	$\lambda=1550\text{nm}$	$\lambda=1490\text{nm}$	$\lambda=1310\text{nm}$
25	138,22	100,98	41,74	138,25	101,00	41,75
30	50,87	34,60	12,33	50,88	34,61	12,34
35	19,44	12,24	3,75	19,44	12,25	3,75
40	7,65	4,45	1,22	7,65	4,45	1,22
45	3,09	1,65	0,55	3,09	1,65	0,55
50	1,27	0,63	0,36	1,27	0,63	0,36

Grafik Pengaruh Panjang Serat Optik Terhadap Kapasitas Kanal QPSK CP=0,0729



Gambar 4.9 Grafik Hubungan Antara Panjang Serat Optik dengan Kapasitas kanal pada Teknik Modulasi QPSK dengan CP = 0,0729

Grafik Pengaruh Panjang Serat Optik Terhadap Kapasitas Kanal QPSK CP=0,2



Gambar 4.10 Grafik Hubungan Antara Panjang Serat Optik dengan Kapasitas kanal pada Teknik Modulasi QPSK dengan CP = 0,2



Tabel 4.21 memaparkan hasil analisa nilai kapasitas kanal pada teknik modulasi QPSK. Selain itu **Gambar 4.9** dan **Gambar 4.10** juga menggambarkan hubungan kapasitas kanal terhadap panjang serat optik yang berubah secara logaritmik, karena hasil perhitungannya dipengaruhi oleh nilai SNR_{sistem} yang berubah secara logaritmik pula terhadap panjang serat optik yang digunakan.

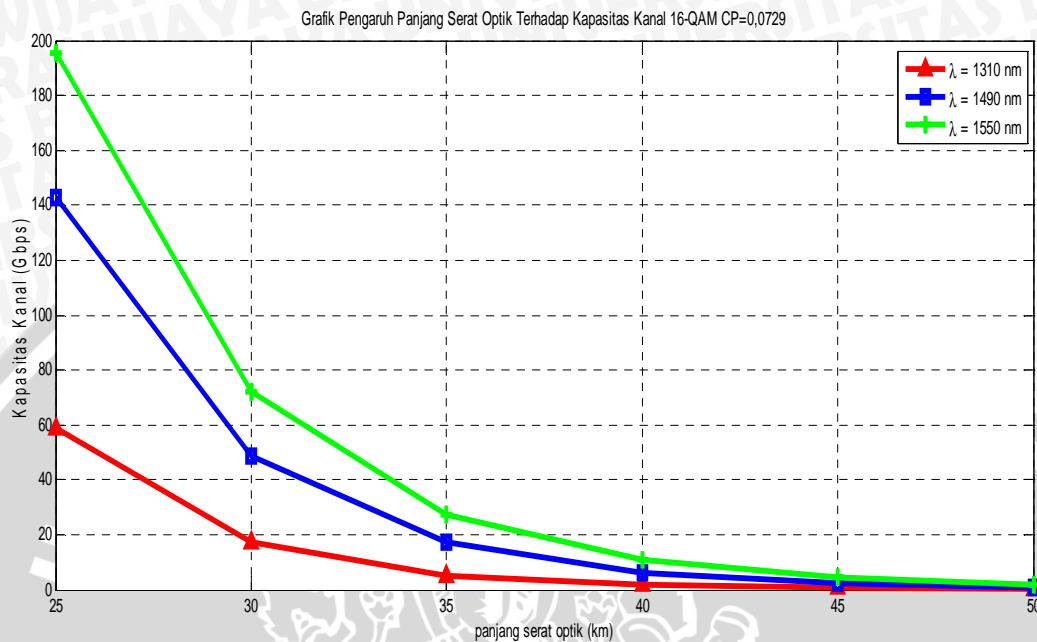
Pada jarak 25 km dengan $CP = 0,0729$ dan panjang gelombang 1550 nm nilai kapasitas kanal adalah sebesar 138,22 Gbps, sedangkan pada jarak 50 km nilainya adalah sebesar 1,27 Gbps. Hal ini membuktikan bahwa semakin jauh atau panjang serat optik yang digunakan maka kapasitas kanal akan semakin kecil, ini terjadi karena semakin jauh jaraknya nilai SNR_{sistem} dan *bandwidth* juga semakin kecil. Selain itu pada jarak dan CP yang sama tetapi pada panjang gelombang 1490 nm dan 1310 nm nilai kapasitas kanal yang didapatkan adalah masing-masing 100,98 Gbps dan 41,74 Gbps. Dapat disimpulkan bahwa nilai kapasitas kanal pada panjang gelombang 1550 nm lebih besar dibandingkan dengan dua panjang gelombang lainnya karena nilai SNR_{sistem} pada 1550 nm juga lebih besar akibat koefisien redamannya yang lebih kecil.

Sedangkan untuk perbedaan CP yang digunakan terlihat pada **Tabel 4.21** bahwa pada jarak dan panjang gelombang sama, pada $CP = 0,0729$ nilainya 138,22 Gbps lebih kecil dibandingkan dengan nilai kapasitas kanal pada $CP = 0,2$ yaitu sebesar 138,25 Gbps. Hal ini terjadi karena perhitungan SNR_{sistem} dan $Bandwidth_{sistem}$ pada $CP = 0,2$ lebih besar dibandingkan dengan $CP = 0,0729$.

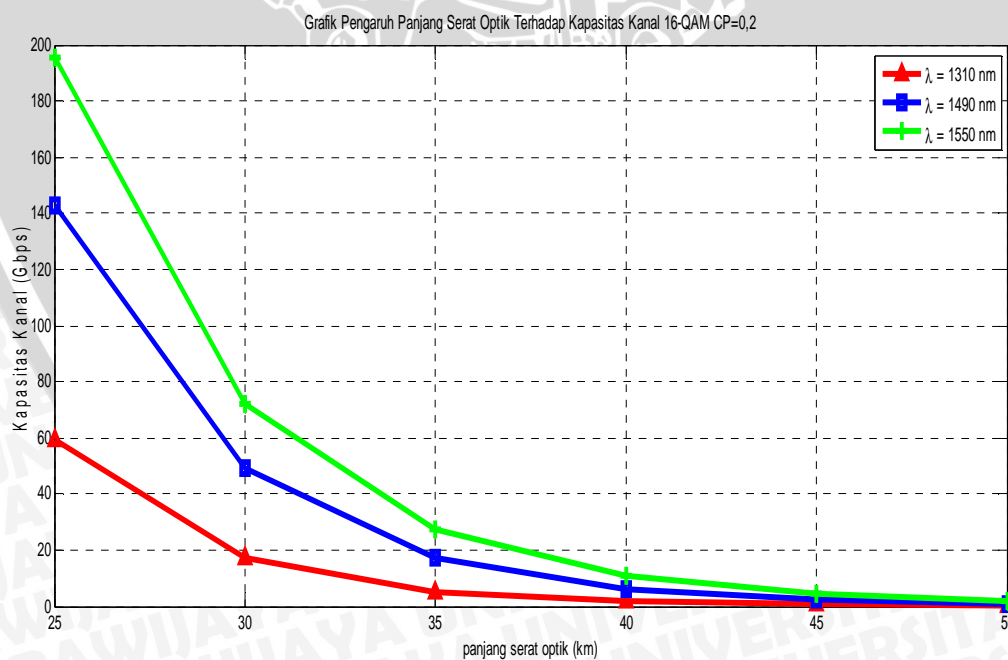
Tabel 4.22 Hasil Analisa Kapasitas Kanal Sistem 16-QAM

Panjang serat optik (Km)	Kapasitas kanal (Gbps)					
	CP = 0,0729			CP = 0,2		
	$\lambda=1550nm$	$\lambda=1490nm$	$\lambda=1310nm$	$\lambda=1550nm$	$\lambda=1490nm$	$\lambda=1310nm$
25	195,48	142,81	59,03	195,51	142,84	59,04
30	71,94	48,93	17,44	71,96	48,94	17,45
35	27,49	17,32	5,30	27,49	17,32	5,30
40	10,82	6,29	1,67	10,82	6,29	1,67
45	4,36	2,33	0,65	4,36	2,33	0,65

50 1,80 0,88 0,39 1,80 0,88 0,39



Gambar 4.11 Grafik Hubungan Antara Panjang Serat Optik dengan Kapasitas kanal pada Teknik Modulasi 16-QAM dengan CP = 0,0729



Gambar 4.12 Grafik Hubungan Antara Panjang Serat Optik dengan Kapasitas kanal pada Teknik Modulasi 16-QAM dengan CP = 0,2

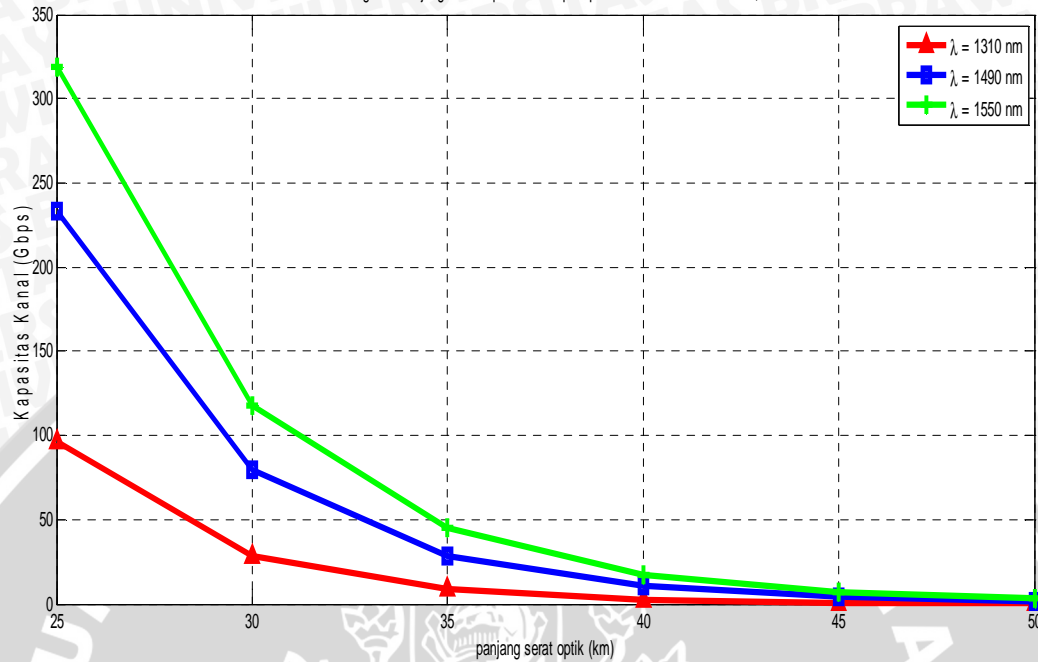
Tabel 4.22 menampilkan hasil perhitungan kapsitas kanal pada teknik modulasi 16-QAM. Dimana pada jarak 25 km dengan CP = 0,0729 dan panjang gelombang 1550 nm nilai kapasitas kanal adalah sebesar 195,48 Gbps, sedangkan pada jarak 50 km nilainya adalah sebesar 1,80 Gbps. Ini membuktikan pula bahwa semakin jauh atau panjang serat optik yang digunakan maka kapasitas kanal akan semakin kecil, ini terjadi karena semakin jauh jaraknya nilai SNR_{sistem} dan *bandwidth* juga semakin kecil. Selain itu pada jarak dan CP yang sama tetapi pada panjang gelombang 1490 nm dan 1310 nm nilai kapasitas kanal yang didapatkan adalah masing-masing 142,81 Gbps dan 59,03 Gbps. Sekali lagi membuktikan bahwa nilai kapasitas kanal pada panjang gelombang 1550 nm lebih besar dibandingkan dengan dua panjang gelombang lainnya karena nilai SNR_{sistem} pada 1550 nm juga lebih besar akibat koefisien redamannya yang lebih kecil.

Sedangkan untuk perbedaan CP yang digunakan terlihat pada **Tabel 4.22** bahwa pada jarak dan panjang gelombang sama, pada CP = 0,0729 nilainya 195,48 Gbps lebih kecil dibandingkan dengan nilai kapasitas kanal pada CP = 0,2 yaitu sebesar 195,51 Gbps. Hal ini terjadi karena perhitungan SNR_{sistem} dan $Bandwidth_{sistem}$ pada CP = 0,2 lebih besar dibandingkan dengan CP = 0,0729.

Tabel 4.23 Hasil Analisa Kapasitas Kanal Sistem 64-QAM

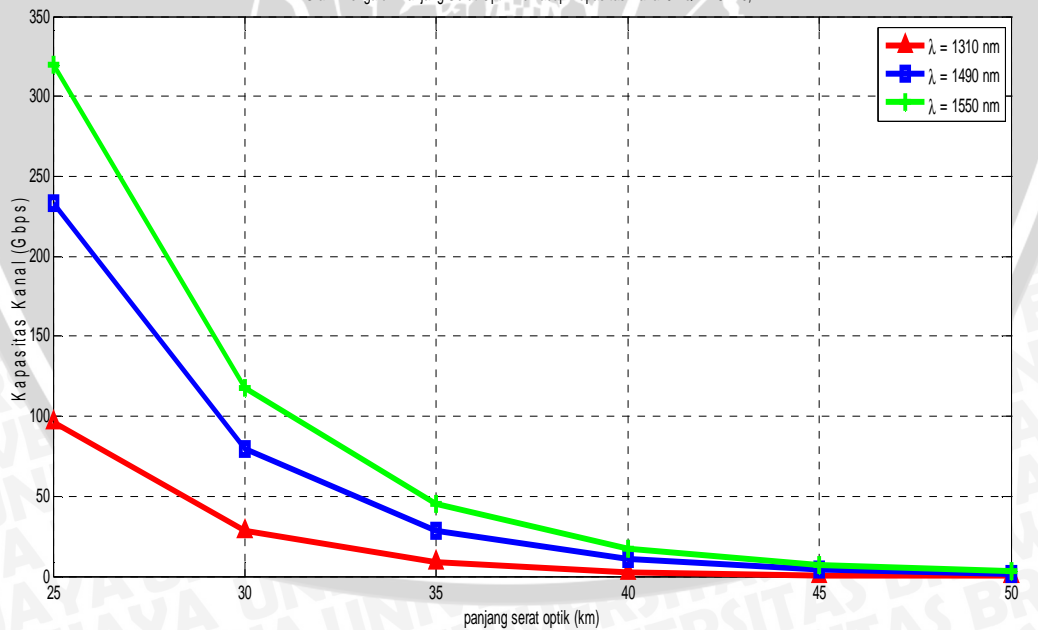
Panjang serat optik (Km)	Kapasitas kanal (Gbps)					
	CP = 0,0729			CP = 0,2		
	$\lambda=1550nm$	$\lambda=1490nm$	$\lambda=1310nm$	$\lambda=1550nm$	$\lambda=1490nm$	$\lambda=1310nm$
25	319,17	233,18	96,39	319,29	233,27	96,42
30	117,47	79,89	28,48	117,51	79,92	28,49
35	44,88	28,27	8,66	44,90	28,28	8,67
40	17,67	10,27	2,69	17,67	10,27	2,69
45	7,13	3,81	0,92	7,13	3,81	0,92
50	2,93	1,44	0,45	2,93	1,44	0,45

Grafik Pengaruh Panjang Serat Optik Terhadap Kapasitas Kanal 64-QAM CP=0,0729



Gambar 4.13 Grafik Hubungan Antara Panjang Serat Optik dengan Kapasitas kanal pada Teknik Modulasi 64-QAM dengan CP = 0,0729

Grafik Pengaruh Panjang Serat Optik Terhadap Kapasitas Kanal 64-QAM CP=0,2



Gambar 4.14 Grafik Hubungan Antara Panjang Serat Optik dengan Kapasitas kanal pada Teknik Modulasi 64-QAM dengan CP = 0,2

Gambar 4.13 dan **Gambar 4.14** adalah grafik nilai kapasitas kanal terhadap panjang serat optik pada teknik modulasi 64-QAM. Dari **Tabel 4.23** dapat diambil beberapa generalisasi diantaranya, pada jarak 25 km dengan CP = 0,0729 dan panjang gelombang 1550 nm nilai kapasitas kanal adalah sebesar 319,17 Gbps, sedangkan pada jarak 50 km nilainya adalah sebesar 2,93 Gbps. Hal ini terjadi karena semakin jauh jaraknya nilai SNR_{sistem} dan *bandwidth* juga semakin kecil. Sedangkan untuk jarak dan CP yang sama tetapi pada panjang gelombang 1490 nm dan 1310 nm nilai kapasitas kanal yang didapatkan adalah masing-masing 233,18 Gbps dan 96,39 Gbps. Sama seperti yang terjadi pada dua teknik modulasi sebelumnya membuktikan bahwa nilai kapasitas kanal pada panjang gelombang 1550 nm lebih besar dibandingkan dengan dua panjang gelombang lainnya karena nilai SNR_{sistem} pada 1550 nm juga lebih besar akibat koefisien redamannya yang lebih kecil.

Sedangkan untuk perbedaan CP yang digunakan terlihat pada **Tabel 4.23** bahwa pada jarak dan panjang gelombang sama, pada CP = 0,0729 nilainya 319,17 Gbps lebih kecil dibandingkan dengan nilai kapasitas kanal pada CP = 0,2 yaitu sebesar 319,29 Gbps. Hal ini terjadi karena perhitungan SNR_{sistem} dan Bandwidth_{sistem} pada CP = 0,2 lebih besar dibandingkan dengan CP = 0,0729.

Berdasarkan nilai-nilai kapasitas kanal yang didapatkan dari **Tabel 4.21**, **Tabel 4.22** maupun **Tabel 4.23**, nilai kapasitas kanal yang terbaik diantara tiga teknik modulasi yang digunakan adalah pada teknik modulasi 64-QAM. Terjadi demikian karena hasil perhitungan SNR_{sistem} pada teknik modulasi 64-QAM juga menunjukkan nilai yang terbaik sehingga nilai kapasitas kanalnya juga sama. Sehingga pada panjang serat 25-50 km ini teknik modulasi yang memiliki kinerja terbaik adalah 64-QAM karena menghasilkan *rate* tertinggi.

4.4 Analisis Bit rate Saluran Serat Optik Teknologi Radio over Fiber (RoF) pada sistem SC-FDMA

Perhitungan *bit rate* dihitung dengan persamaan (2.25), sehingga untuk panjang gelombang 1550nm dan panjang serat optik 50km menggunakan teknik modulasi QPSK didapatkan :

$$\Delta\tau_{mat} = D_m \times \Delta\lambda \times L$$

$$\Delta\tau_{mat} = 16,33 \times 0.1 \times 50 = 81,65$$

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

$$\Delta\tau_{\text{sistem}} = \sqrt{(16)^2 + (25)^2 + (81,65)^2} = 86,88 \text{ psec}$$

$$B_{R(\text{NRZ})} = \frac{\Delta\tau_{\text{sistem}}}{0,7}$$

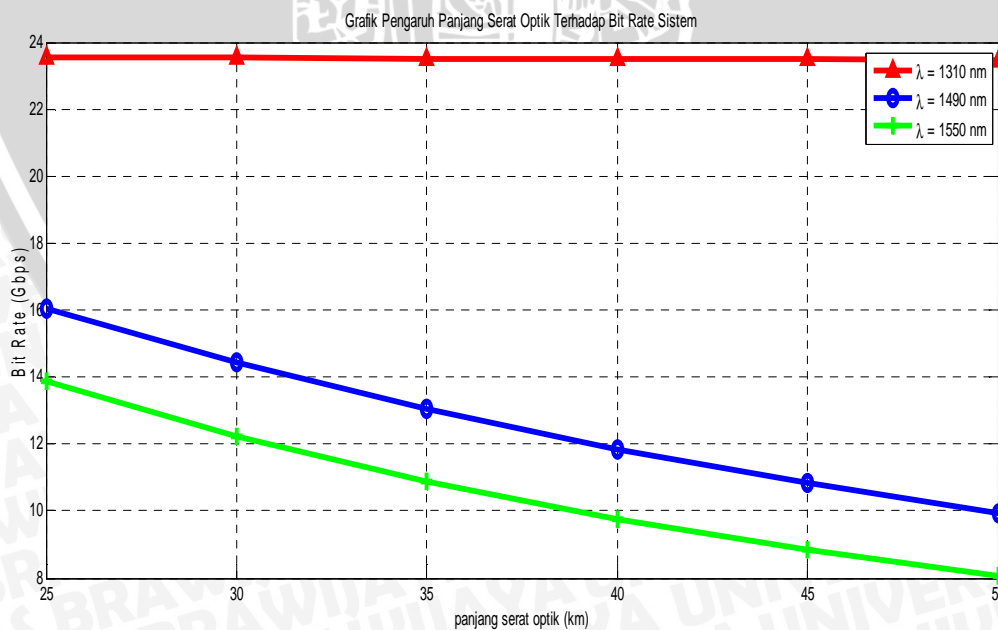
$$B_{R(\text{NRZ})} = \frac{86,88}{0,7} = 8,06 \text{ Gbps}$$

Perhitungan juga dilakukan dengan cara yang sama pada dua jenjang panjang gelombang lainnya dan juga teknik modulasi yang berbeda dan hasilnya ditampilkan pada

Tabel 4.24 :

Tabel 4.24 Hasil Analisis *Bit rate*

Panjang serat optik (km)	<i>Bit rate</i> (Gbps)		
	$\lambda=1550\text{nm}$	$\lambda=1490\text{nm}$	$\lambda=1310\text{nm}$
25	13,8684	16,0582	25,5515
30	12,2206	14,4440	23,5374
35	10,8691	13,0468	23,5208
40	9,7564	11,8488	23,5017
45	8,8325	10,8229	23,4801
50	8,0573	9,9415	23,4560



Gambar 4.15 Grafik Hubungan Antara Panjang Serat Optik dengan *Bit rate* sistem

Tabel 4.24 menjelaskan hubungan antara panjang serat optik dengan *bit rate* pada kanal optik. Baik pada panjang gelombang 1310 nm, 1490 nm ataupun 1550 nm didapatkan bahwa panjang serat optik berbanding terbalik dengan nilai *bit rate* sistem kanal optik. Semakin pendek panjang serat optik yang digunakan maka nilai *bit rate* sitem semakin besar. Hal ini terjadi karena semakin pendek panjang serat optik yang digunakan maka semakin kecil pula nilai dispersi material suatu sistem sehingga nilai *bit rate* semakin besar. Contohnya pada panjang gelombang 1550 nm pada panjang serat optik 25 km nilai *bit rate* yang didapat sebesar 13,8684 Gbps sedangkan pada jarak 50 km didapatkan nilai *bit rate* sebesar 8,0573 Gbps.

Pada panjang gelombang 1310 nm di jarak serat optik 25 km *bit rate* sistem bernilai 25,5515 Gbps. Sedangkan pada di jarak yang sama pada panjang gelombang 1490 nm dan 1550 nm masing-masing didapatkan nilai *bit rate* sebesar 9,9415 Gbps dan 8,0573 Gbps. Hal ini terjadi karena panjang gelombang 1310 nm memiliki nilai koefisien dispersi yang jauh lebih kecil dibandingkan dengan kedua panjang gelombang lainnya. Dan juga karena nilai koefisien yang relatif kecil ini menyebabkan nilai *bit rate* dari panjang serat optik 25 – 50 km mendekati konstan. Sehingga dari sisi *bit rate*, sistem ini akan berkerja paling baik pada λ 1310 nm.

4.5 Analisis *Bit error rate* Teknologi *Radio over Fiber* (RoF) pada sistem SC-FDMA

Bit Error Rate (BER) adalah perbandingan nilai bit yang salah saat proses transmisi berlangsung, dihitung di sisi *receiver*. BER diharapkan memiliki nilai yang sekecil mungkin agar diperoleh kualitas sinyal yang baik. Oleh karena itu, BER sistem tergantung pada ukuran kualitas sinyal (SNR_{sistem}) yang diterima. Berdasarkan perhitungan terhadap SNR_{sistem} pada teknik modulasi QPSK dengan $CP=0,0729$ untuk panjang serat optik 50 km $SNR_{sistem} = 15,7674\text{dB}$ pada penggunaan panjang gelombang 1550nm, sehingga diperoleh BER sistem sesuai dengan persamaan (2.24) sebesar :

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \sqrt{SNR_{sistem}}$$

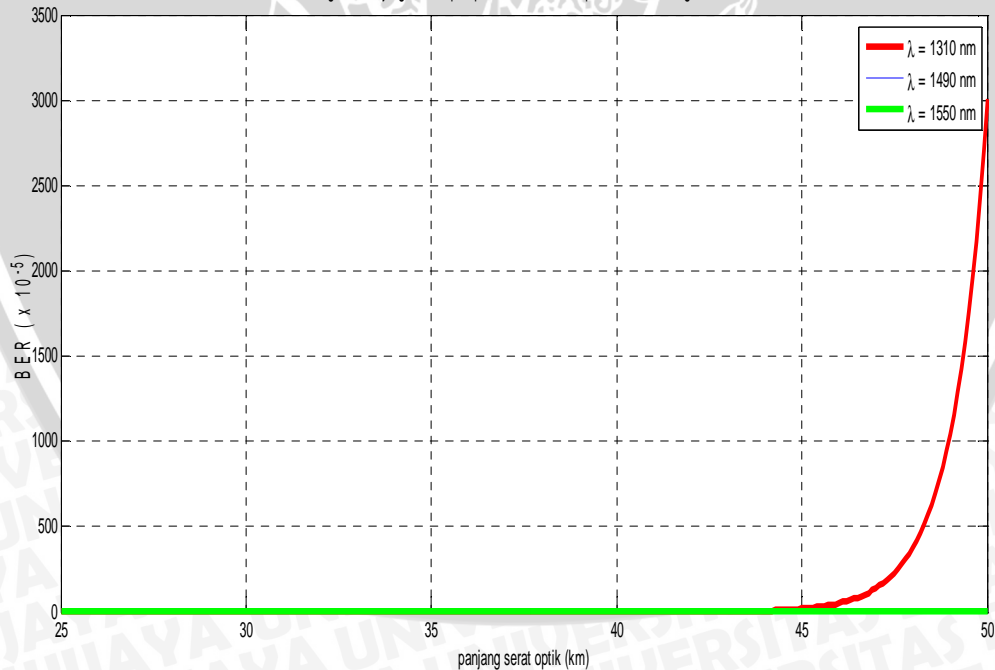
$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \sqrt{15,7674} = x 10^{-13}$$

Dengan cara yang sama maka diperoleh seluruh nilai hasil pengukuran BER baik pada teknik modulasi QPSK, 16-QAM maupun 64-QAM dengan panjang gelombang dan juga jenis CP yang berbeda. Semua nilainya disajikan pada **Tabel 4.25**:

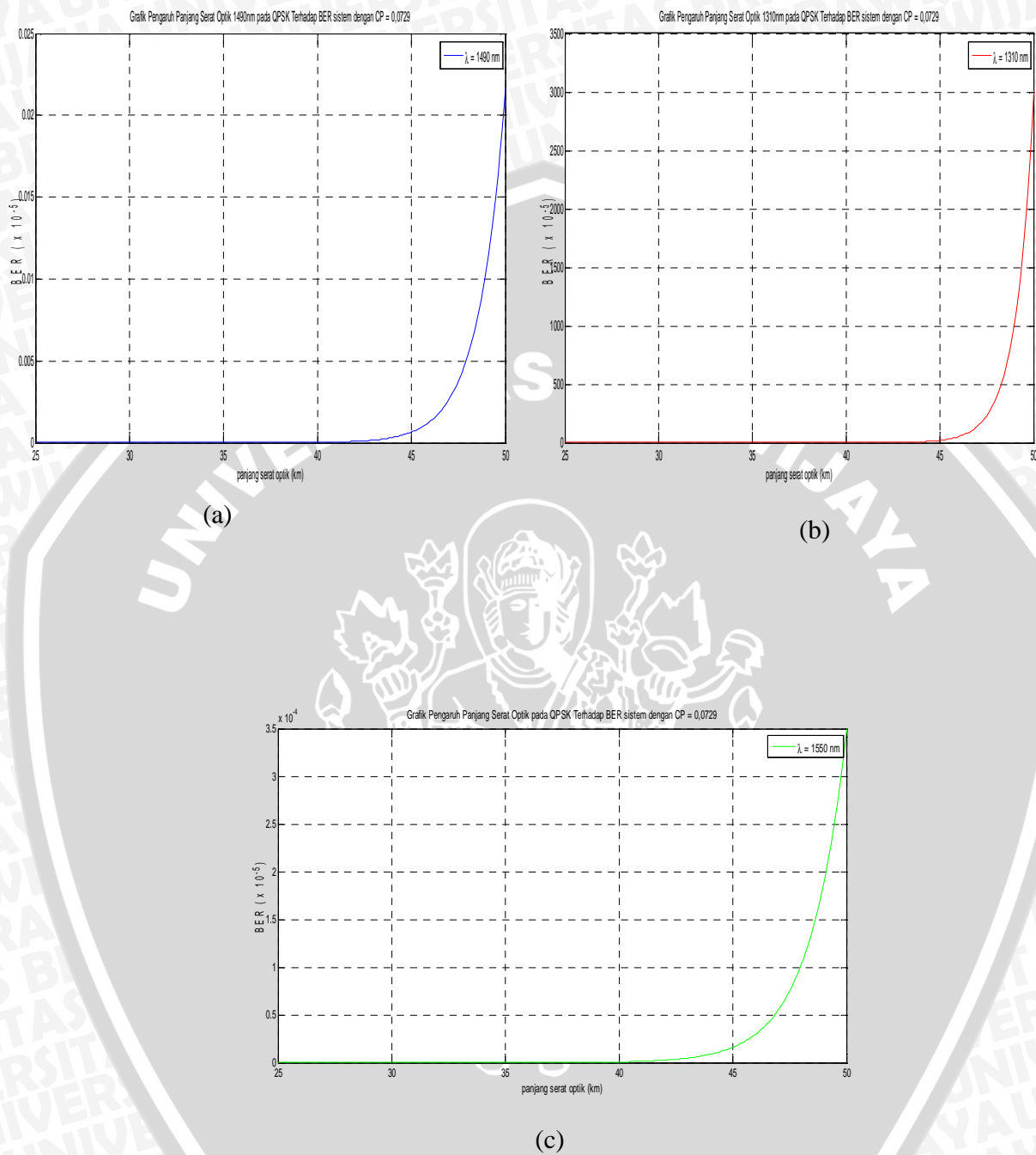
Tabel 4.25 Hasil Analisa BER pada Sistem QPSK

Panjang serat optik (Km)	BER _{sistem}					
	CP = 0,0729			CP = 0,2		
	$\lambda=1550\text{nm}$	$\lambda=1490\text{nm}$	$\lambda=1310\text{nm}$	$\lambda=1550\text{nm}$	$\lambda=1490\text{nm}$	$\lambda=1310\text{nm}$
25	$7,88 \times 10^{-11}$	$6,01 \times 10^{-10}$	$1,62 \times 10^{-7}$	$7,87 \times 10^{-11}$	$6,00 \times 10^{-10}$	$1,62 \times 10^{-7}$
30	$1,66 \times 10^{-9}$	$1,91 \times 10^{-8}$	$1,61 \times 10^{-5}$	$1,66 \times 10^{-9}$	$1,91 \times 10^{-8}$	$1,61 \times 10^{-5}$
35	$3,52 \times 10^{-8}$	$6,11 \times 10^{-7}$	$1,63 \times 10^{-3}$	$3,51 \times 10^{-8}$	$6,11 \times 10^{-7}$	$1,64 \times 10^{-3}$
40	$7,50 \times 10^{-7}$	$1,98 \times 10^{-5}$		$7,49 \times 10^{-7}$	$1,98 \times 10^{-5}$	
45	$1,61 \times 10^{-5}$	$6,49 \times 10^{-4}$		$1,61 \times 10^{-5}$	$6,48 \times 10^{-4}$	
50	$3,5 \times 10^{-4}$			$3,50 \times 10^{-4}$		

Grafik Pengaruh Panjang Serat Optik pada QPSK Terhadap BER sistem dengan CP = 0,0729



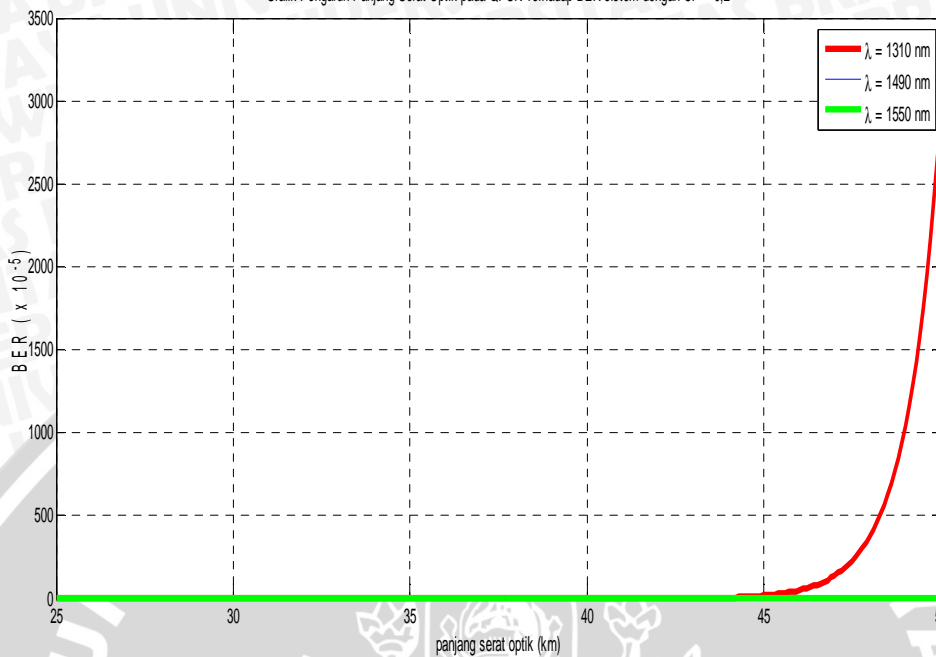
Gambar 4.16 Grafik Hubungan Antara Panjang Serat Optik dengan BER pada Teknik Modulasi QPSK dengan CP = 0,0729



Gambar 4.17 Grafik Hubungan Antara Panjang Serat Optik dengan BER pada Teknik Modulasi QPSK dengan CP = 0,0729

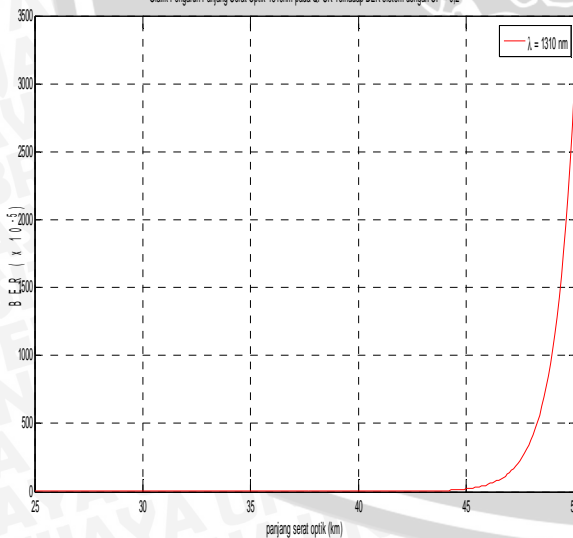
Untuk (a) $\lambda = 1310$ nm (b) $\lambda = 1490$ nm (c) $\lambda = 1550$ nm

Grafik Pengaruh Panjang Serat Optik pada QPSK Terhadap BER sistem dengan CP = 0,2



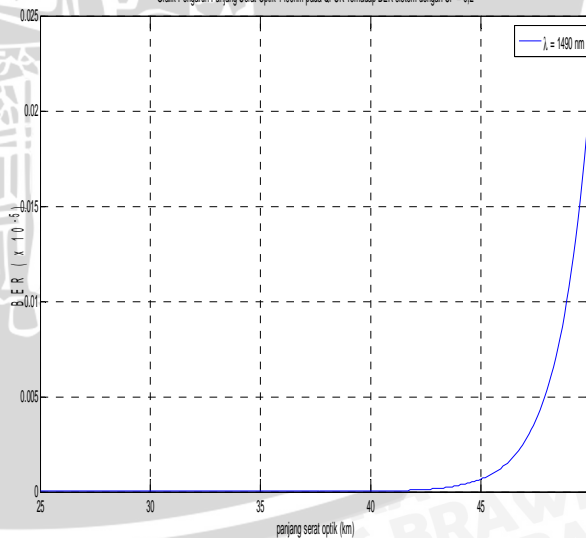
Gambar 4.18 Grafik Hubungan Antara Panjang Serat Optik dengan BER pada Teknik Modulasi QPSK dengan CP = 0,2

Grafik Pengaruh Panjang Serat Optik 1310nm pada QPSK Terhadap BER sistem dengan CP = 0,2

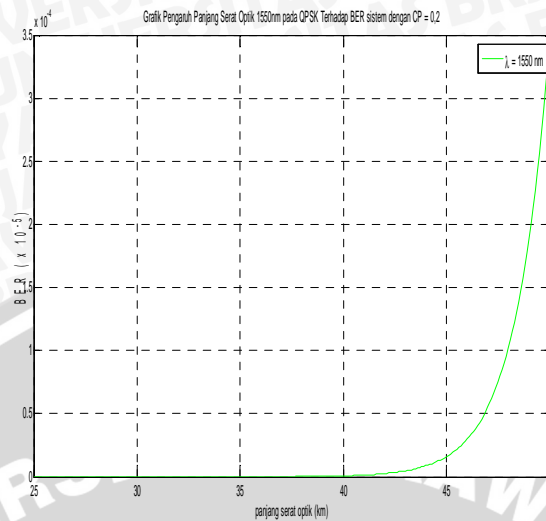


(a)

Grafik Pengaruh Panjang Serat Optik 1490nm pada QPSK Terhadap BER sistem dengan CP = 0,2



(b)



(c)

Gambar 4.19 Grafik Hubungan Antara Panjang Serat Optik dengan BER pada Teknik Modulasi QPSK dengan CP = 0,2 Untuk (a) $\lambda = 1310$ nm (b) $\lambda = 1490$ nm (c) $\lambda = 1550$ nm

Tabel 4.25 menunjukkan nilai hasil perhitungan BER_{sistem} pada teknik modulasi QPSK. Dari data-data tersebut dapat diketahui bahwa nilai BER_{sistem} saat CP yang 0,2 pada panjang gelombang 1550 nm dan jarak 25 km adalah sebesar $7,88 \times 10^{-11}$, sedangkan pada panjang gelombang dan jarak yang sama dengan CP 0,0729 didapatkan nilai sebesar $7,87 \times 10^{-11}$. Walaupun perbedaannya sangat kecil hal ini dikarenakan perhitungan SNR_{sistem} pada CP 0,2 lebih besar daripada CP 0,0729 sehingga nilai BER_{sistem} juga semakin baik dalam hal ini nilainya semakin kecil.

Pada jarak yang sama yaitu 25 km dan CP = 0,2 untuk panjang gelombang 1310 nm, 1490 nm dan 1550 nm nilai BER_{sistem} nya berturut-turut adalah $1,62 \times 10^{-7}$, $6,01 \times 10^{-10}$ dan $7,88 \times 10^{-11}$ seperti terlihat juga pada **Gambar 4.17**. Nilai BER_{sistem} pada panjang gelombang 1550 nm lebih kecil bisa juga dikatakan terbaik dibanding dua panjang gelombang lainnya karena nilai SNR_{sistem} nya juga paling tinggi.

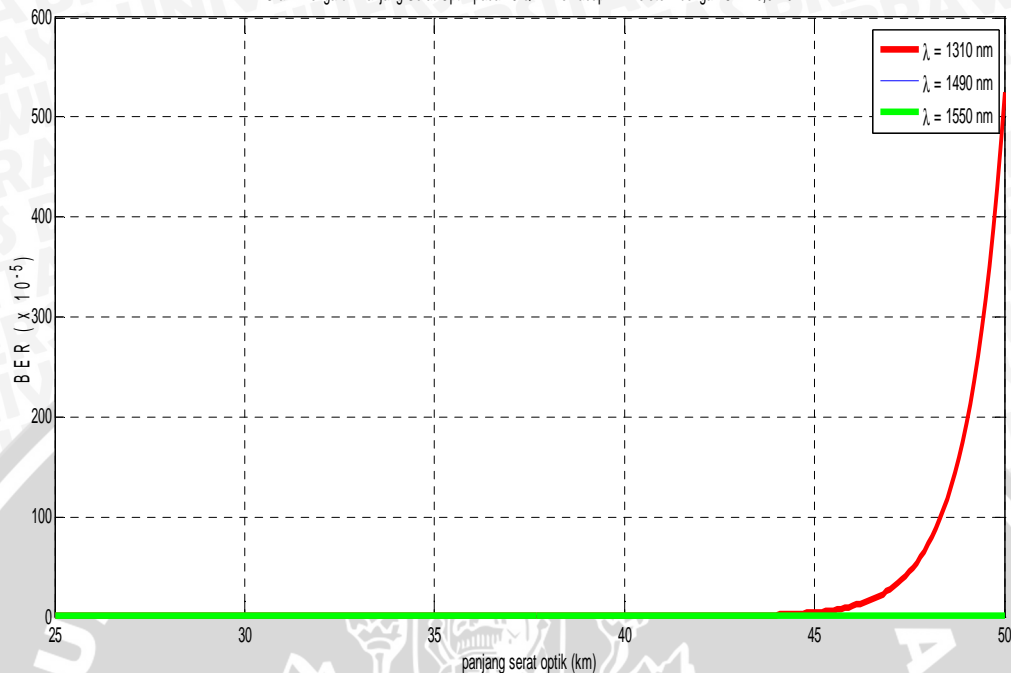
Selain itu pada CP = 0,2 dan panjang gelombang 1550 nm pada panjang serat optik 25 km nilai BER_{sistem} adalah sebesar $7,88 \times 10^{-11}$ sedangkan pada panjang serat optik 50 km nilainya sebesar $3,5 \times 10^{-4}$. Hal ini membuktikan bahwa panjang serat optik berbanding

lurus dengan nilai BER_{sistem} dimana semakin panjang serat optik yang digunakan maka nilai BER_{sistem} semakin besar pula.

Tabel 4.26 Hasil Analisa BER pada Sistem 16-QAM

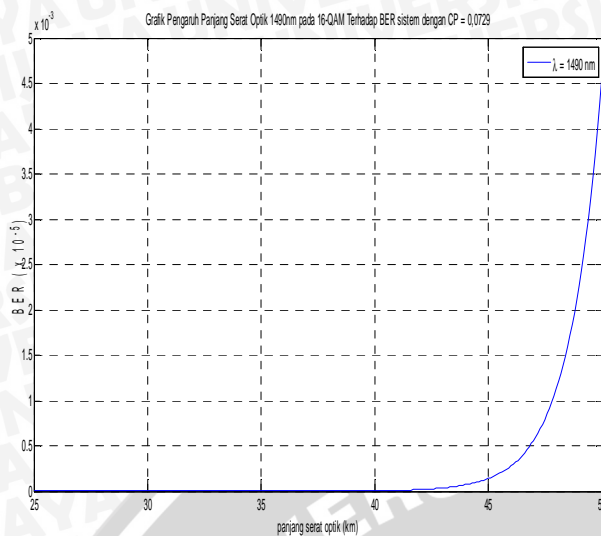
Panjang serat optik (Km)	BER _{sistem}					
	CP = 0,0729			CP = 0,2		
	$\lambda=1550\text{nm}$	$\lambda=1490\text{nm}$	$\lambda=1310\text{nm}$	$\lambda=1550\text{nm}$	$\lambda=1490\text{nm}$	$\lambda=1310\text{nm}$
25	$1,71 \times 10^{-11}$	$1,30 \times 10^{-10}$	$3,50 \times 10^{-8}$	$1,71 \times 10^{-11}$	$1,30 \times 10^{-10}$	$3,50 \times 10^{-8}$
30	$3,60 \times 10^{-10}$	$4,12 \times 10^{-9}$	$3,45 \times 10^{-6}$	$3,59 \times 10^{-10}$	$4,12 \times 10^{-9}$	$3,45 \times 10^{-6}$
35	$7,60 \times 10^{-9}$	$1,32 \times 10^{-7}$	$3,48 \times 10^{-4}$	$7,59 \times 10^{-9}$	$1,31 \times 10^{-7}$	$3,48 \times 10^{-4}$
40	$1,61 \times 10^{-7}$	$4,24 \times 10^{-6}$	$36,32 \times 10^{-3}$	$1,61 \times 10^{-7}$	$4,23 \times 10^{-6}$	$36,26 \times 10^{-3}$
45	$3,45 \times 10^{-6}$	$1,38 \times 10^{-4}$		$3,45 \times 10^{-6}$	$1,38 \times 10^{-4}$	
50	$7,46 \times 10^{-5}$	$4,6 \times 10^{-3}$		$7,45 \times 10^{-5}$	$4,57 \times 10^{-3}$	

Grafik Pengaruh Panjang Serat Optik pada 16-QAM Terhadap BER sistem dengan CP = 0,0729

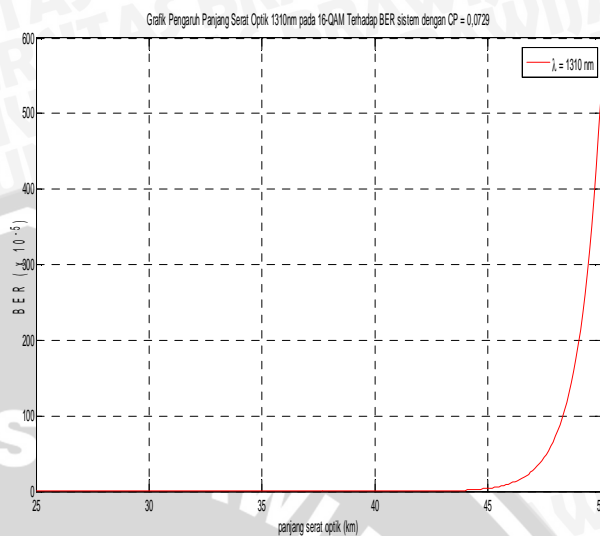


Gambar 4.20 Grafik Hubungan Antara Panjang Serat Optik dengan BER pada Teknik Modulasi 16-QAM dengan CP = 0,0729

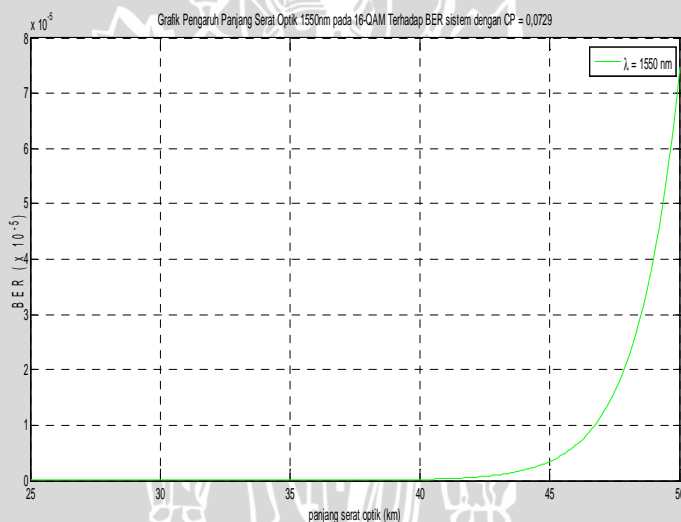




(a)



(b)

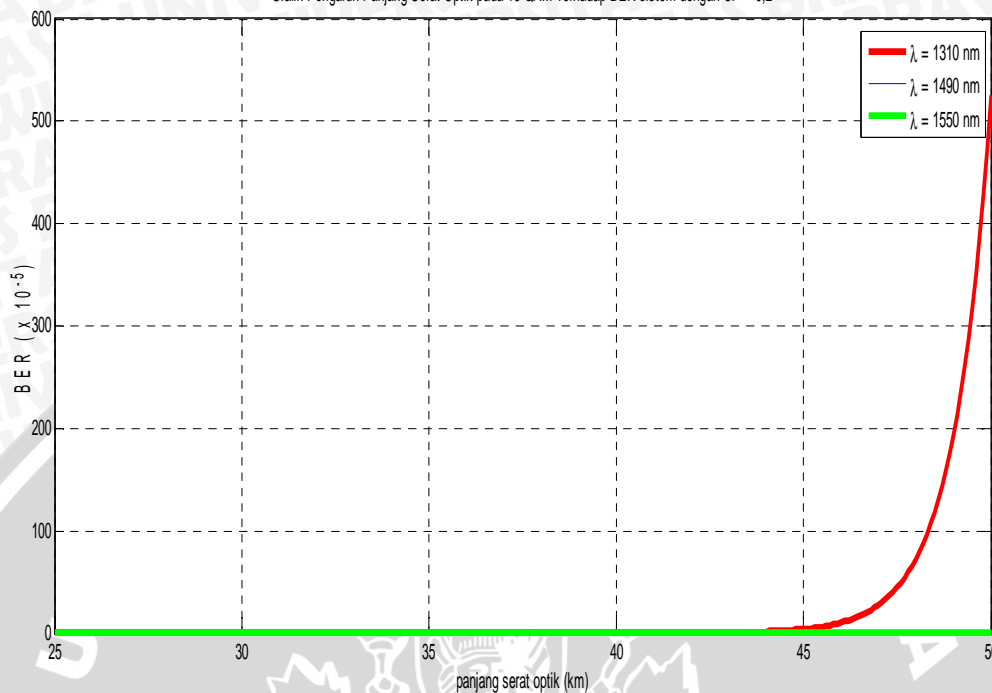


(c)

Gambar 4.21 Grafik Hubungan Antara Panjang Serat Optik dengan BER pada Teknik Modulasi 16-QAM dengan CP = 0,0729

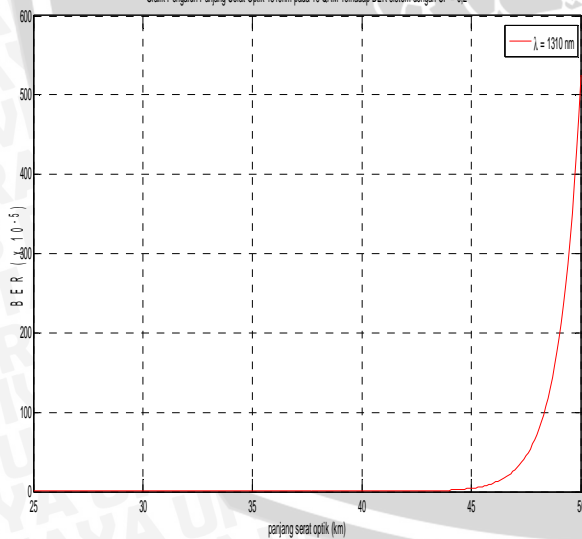
Untuk (a) $\lambda = 1310$ nm (b) $\lambda = 1490$ nm (c) $\lambda = 1550$ nm

Grafik Pengaruh Panjang Serat Optik pada 16-QAM Terhadap BER sistem dengan CP = 0,2



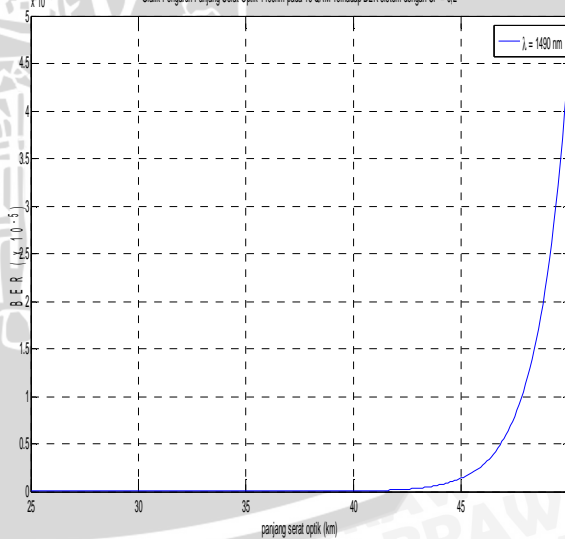
Gambar 4.22 Grafik Hubungan Antara Panjang Serat Optik dengan BER pada Teknik Modulasi 16-QAM dengan CP = 0,2

Grafik Pengaruh Panjang Serat Optik 1310nm pada 16-QAM Terhadap BER sistem dengan CP = 0,2

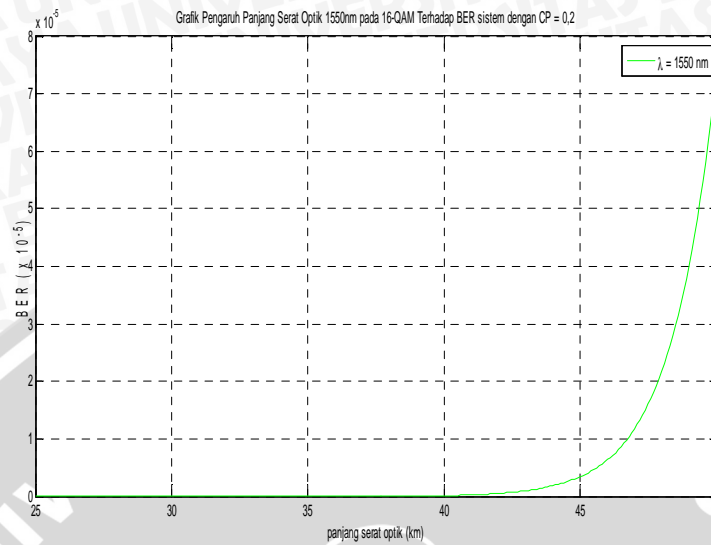


(a)

Grafik Pengaruh Panjang Serat Optik 1490nm pada 16-QAM Terhadap BER sistem dengan CP = 0,2



(b)



Gambar 4.23 Grafik Hubungan Antara Panjang Serat Optik dengan BER pada Teknik Modulasi 16-QAM dengan CP = 0,2 Untuk (a) $\lambda = 1310$ nm (b) $\lambda = 1490$ nm (c) $\lambda = 1550$ nm

Tabel 4.26 menunjukkan nilai hasil perhitungan BER_{sistem} pada teknik modulasi 16-QAM. Melihat tabel tersebut dapat diketahui bahwa nilai BER_{sistem} saat CP yang 0,2 pada panjang gelombang 1310 nm, 1490nm maupun 1550 nm dan pada panjang serat optik 25 – 50 km rata-rata nilai BER_{sistem} nya lebih besar dibandingkan nilai BER_{sistem} pada CP 0,0729. Walaupun perbedaannya sangat kecil hal ini dikarenakan perhitungan SNR_{sistem} pada CP 0,2 lebih besar daripada CP 0,0729 sehingga nilai BER_{sistem} juga semakin baik dalam hal ini nilainya semakin kecil.

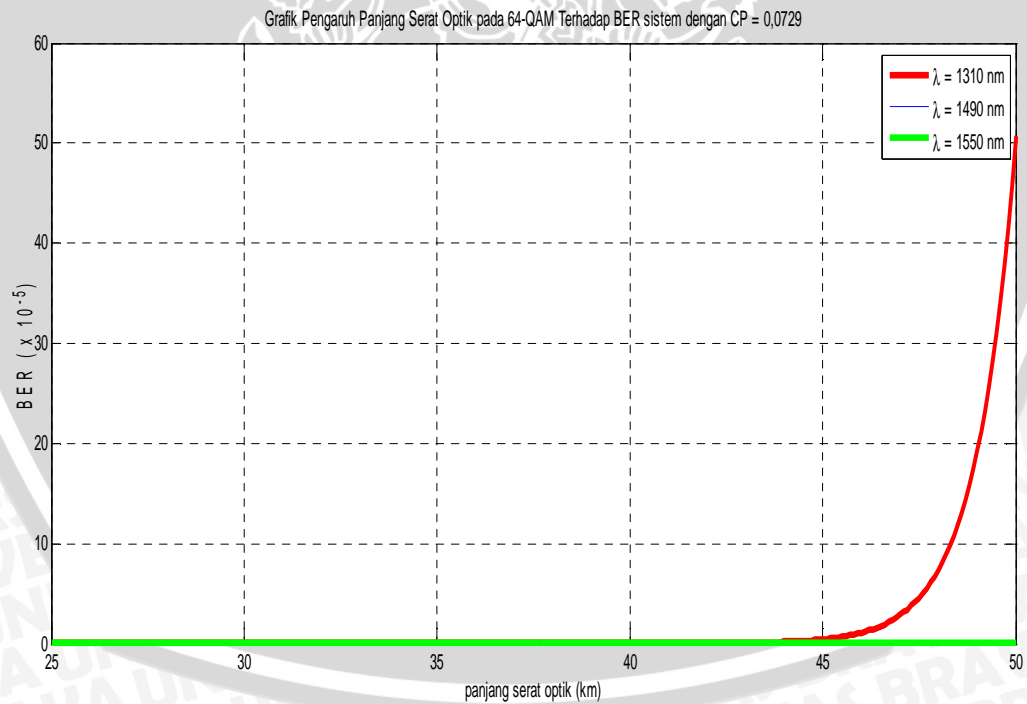
Pada semua jarak yang sama dan jenis CP yang digunakan untuk panjang gelombang 1310 nm , 1490 nm dan 1550 nm nilai BER_{sistem} nya berturut-turut seperti terlihat juga pada **Gambar 4.21** dan **Gambar 4.23**. Nilai BER_{sistem} pada panjang gelombang 1550 nm selalu lebih kecil bisa juga dikatakan terbaik dibanding dua panjang gelombang lainnya karena nilai SNR_{sistem} nya juga paling tinggi.

Selain itu pada CP dan panjang gelombang manapun pada panjang serat optik 25 km nilai BER_{sistem} nya lebih kecil bila dibandingkan pada panjang serat optik 50 km. Hal ini

membuktikan bahwa panjang serat optik berbanding lurus dengan nilai BER_{sistem} dimana semakin panjang serat optik yang digunakan maka nilai BER_{sistem} semakin besar pula.

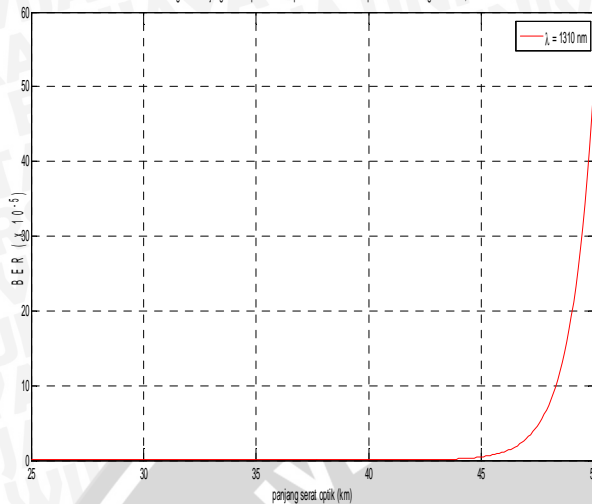
Tabel 4.27 Hasil Analisa BER pada Sistem 64-QAM

Panjang serat optik (Km)	BER _{sistem}					
	CP = 0,0729			CP = 0,2		
	$\lambda=1550\text{nm}$	$\lambda=1490\text{nm}$	$\lambda=1310\text{nm}$	$\lambda=1550\text{nm}$	$\lambda=1490\text{nm}$	$\lambda=1310\text{nm}$
25	$1,97 \times 10^{-12}$	$1,50 \times 10^{-11}$	$4,00 \times 10^{-9}$	$1,97 \times 10^{-12}$	$1,50 \times 10^{-11}$	$3,99 \times 10^{-9}$
30	$4,14 \times 10^{-11}$	$4,73 \times 10^{-10}$	$3,92 \times 10^{-7}$	$4,13 \times 10^{-11}$	$4,73 \times 10^{-10}$	$3,92 \times 10^{-7}$
35	$8,71 \times 10^{-10}$	$1,50 \times 10^{-8}$	$3,91 \times 10^{-5}$	$8,70 \times 10^{-10}$	$1,50 \times 10^{-8}$	$3,90 \times 10^{-5}$
40	$1,84 \times 10^{-8}$	$4,81 \times 10^{-7}$	$4,00 \times 10^{-3}$	$1,84 \times 10^{-8}$	$4,80 \times 10^{-7}$	$3,99 \times 10^{-3}$
45	$3,92 \times 10^{-6}$	$1,56 \times 10^{-5}$		$3,92 \times 10^{-6}$	$1,55 \times 10^{-5}$	
50	$8,41 \times 10^{-6}$	$5,10 \times 10^{-4}$		$8,40 \times 10^{-6}$	$5,09 \times 10^{-4}$	



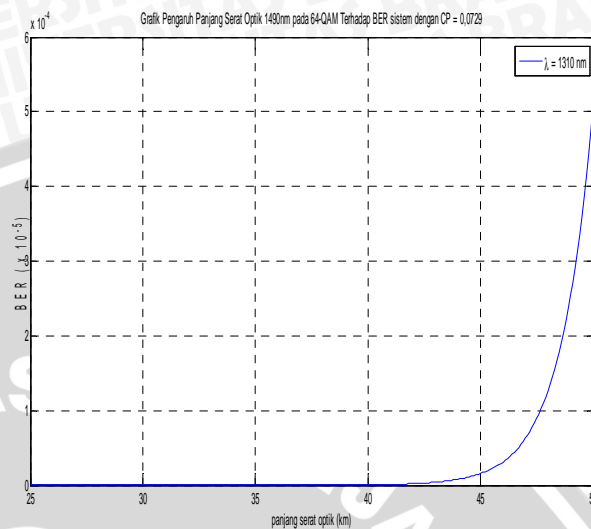
Gambar 4.24 Grafik Hubungan Antara Panjang Serat Optik dengan BER pada Teknik Modulasi 64-QAM dengan CP = 0,0729

Grafik Pengaruh Panjang Serat Optik 1310nm pada 64-QAM Terhadap BER sistem dengan CP = 0,0729



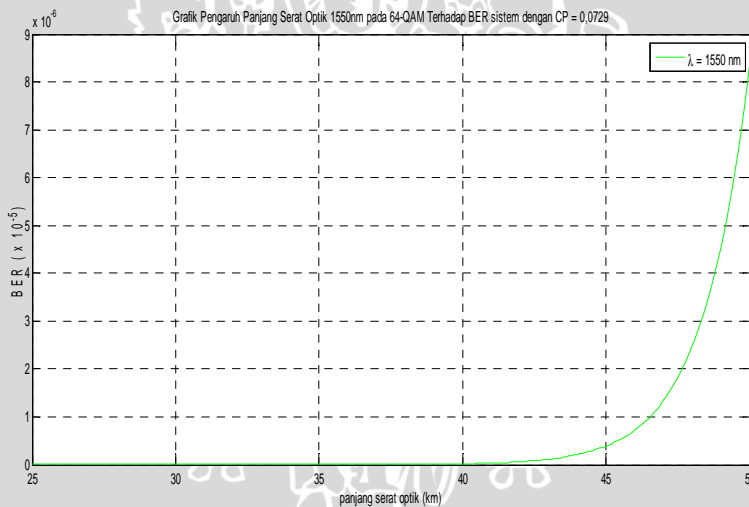
(a)

Grafik Pengaruh Panjang Serat Optik 1490nm pada 64-QAM Terhadap BER sistem dengan CP = 0,0729



(b)

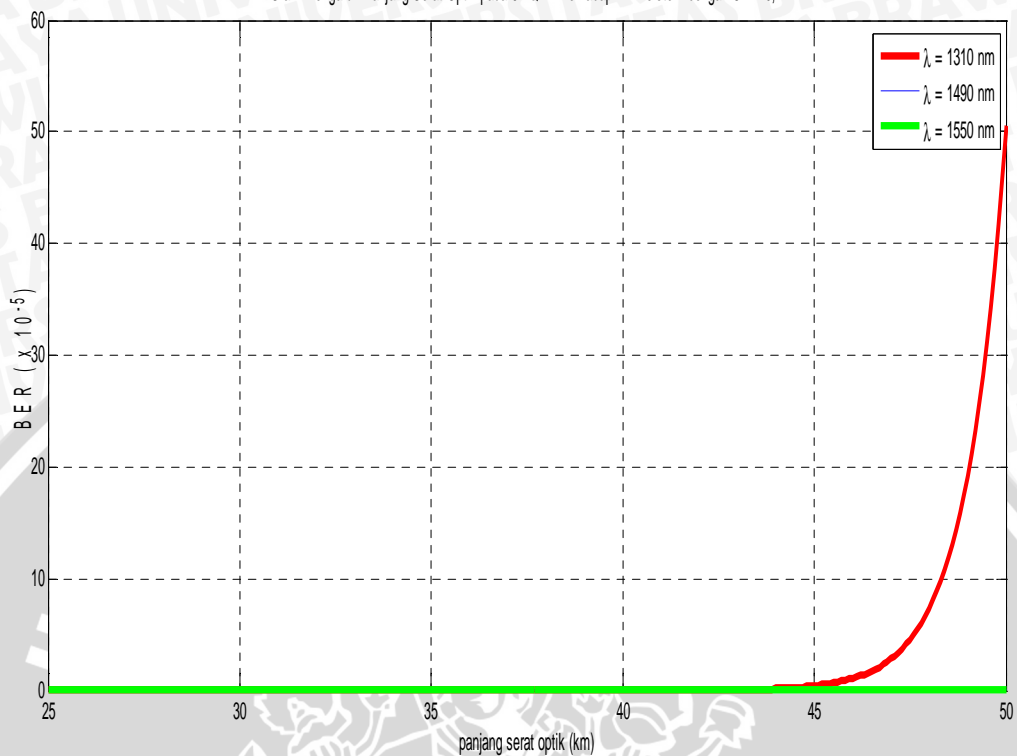
Grafik Pengaruh Panjang Serat Optik 1550nm pada 64-QAM Terhadap BER sistem dengan CP = 0,0729



(c)

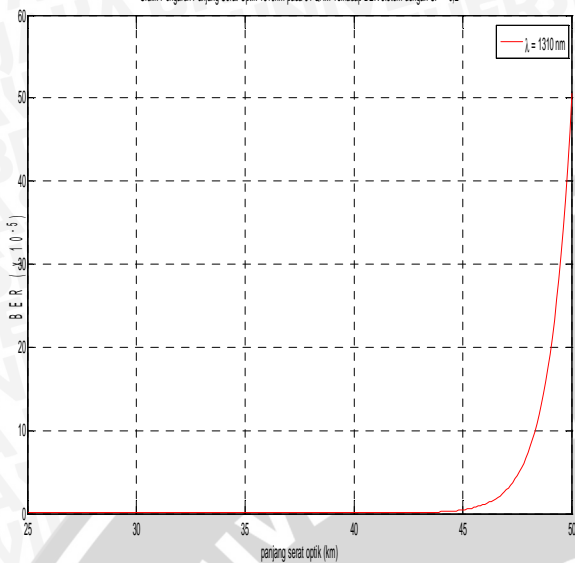
Gambar 4.25 Grafik Hubungan Antara Panjang Serat Optik dengan BER pada Teknik Modulasi 64-QAM dengan CP = 0,0729 Untuk (a) $\lambda = 1310$ nm (b) $\lambda = 1490$ nm (c) $\lambda = 1550$ nm

Grafik Pengaruh Panjang Serat Optik pada 64-QAM Terhadap BER sistem dengan CP = 0,2



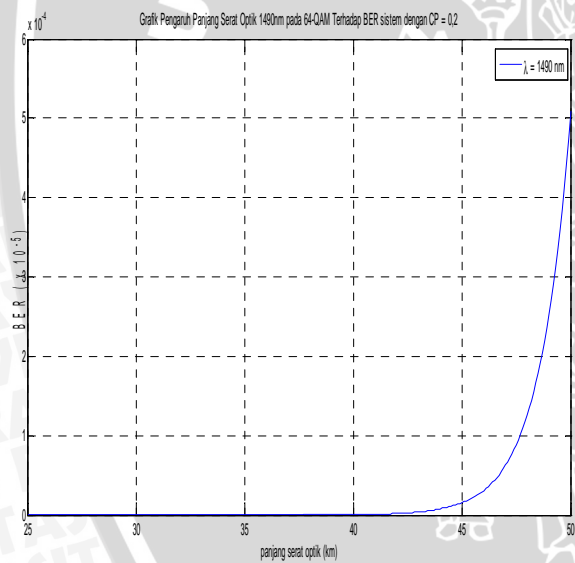
Gambar 4.26 Grafik Hubungan Antara Panjang Serat Optik dengan BER pada Teknik Modulasi 64-QAM dengan CP = 0,2

Gratik Pengaruh Panjang Serat Optik 1310nm pada 64-QAM Terhadap BER sistem dengan CP = 0.2

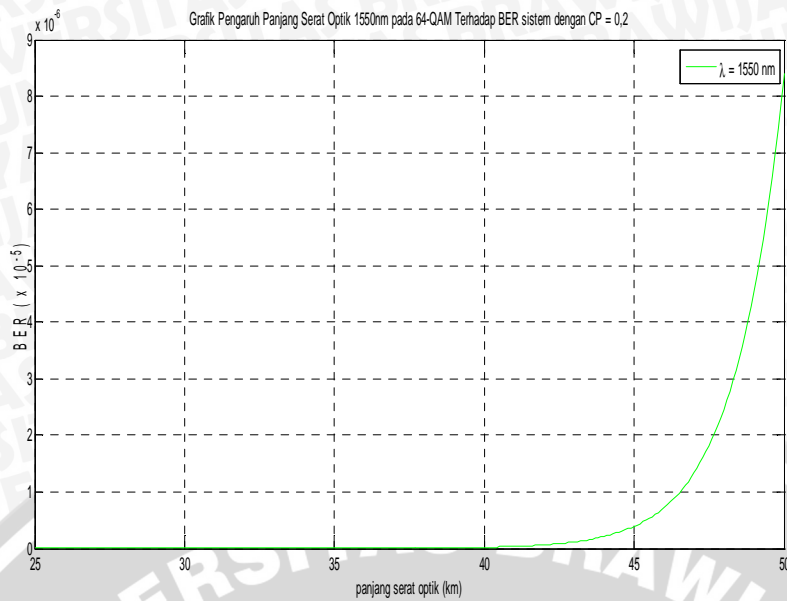


(a)

Gratik Pengaruh Panjang Serat Optik 1490nm pada 64-QAM Terhadap BER sistem dengan CP = 0.2



(b)



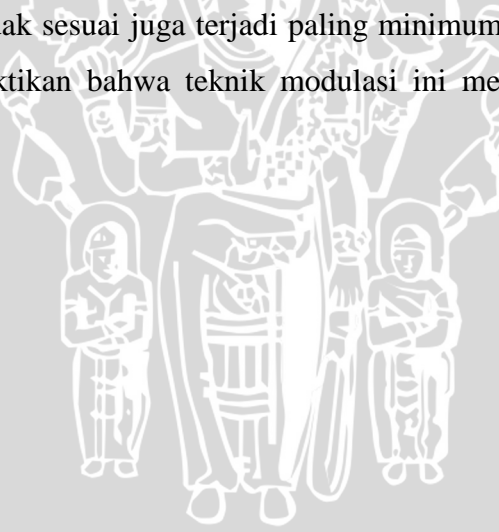
Gambar 4.27 Grafik Hubungan Antara Panjang Serat Optik dengan BER pada Teknik Modulasi 64-QAM dengan CP = 0,2
Untuk (a) $\lambda = 1310$ nm (b) $\lambda = 1490$ nm (c) $\lambda = 1550$ nm

Tabel 4.27 menunjukkan nilai hasil perhitungan BER_{sistem} pada teknik modulasi 64-QAM. Melihat tabel tersebut dapat diketahui bahwa nilai BER_{sistem} saat CP yang 0,2 pada panjang gelombang 1310 nm, 1490nm maupun 1550 nm dan pada panjang serat optik 25 – 50 km rata-rata nilai BER_{sistem} nya lebih besar dibandingkan nilai BER_{sistem} pada CP 0,0729. Walaupun perbedaannya sangat kecil hal ini dikarenakan perhitungan SNR_{sistem} pada CP 0,2 lebih besar daripada CP 0,0729 sehingga nilai BER_{sistem} juga semakin baik dalam hal ini nilainya semakin kecil.

Pada semua jarak yang sama dan jenis CP yang digunakan untuk panjang gelombang 1310 nm , 1490 nm dan 1550 nm nilai BER_{sistem} nya berturut-turut seperti terlihat juga pada **Gambar 4.25** dan **Gambar 4.27**. Nilai BER_{sistem} pada panjang gelombang 1550 nm selalu lebih kecil bisa juga dikatan terbaik dibanding dua panjang gelombang lainnya karena nilai SNR_{sistem} nya juga paling tinggi.

Selain itu pada CP dan panjang gelombang manapun pada panjang serat optik 25 km nilai BER_{sistem} nya lebih kecil bila dibandingkan pada panjang serat optik 50 km. Hal ini membuktikan bahwa panjang serat optik berbanding lurus dengan nilai BER_{sistem} dimana semakin panjang serat optik yang digunakan maka nilai BER_{sistem} semakin besar pula.

Semakin kecil nilai BER maka semakin baik pula sebuah sistem tersebut, karena nilai BER yang kecil berarti hanya sedikit kesalahan yang terjadi dalam transmisi, dengan kata lain data yang diterima semakin menyerupai data yang dikirimkan. Nilai BER_{sistem} terbaik adalah $1,97 \times 10^{-12}$ untuk panjang gelombang 1550 nm dan panjang serat optik 25 km CP = 0,0729 dan teknik modulasi 64-QAM. Sedangkan nilai BER terburuk atau tertinggi untuk sistem ini ditemukan di beberapa titik dalam sistem ini yaitu ditunjukkan pada kolom-kolom di **Tabel 4.25**, **Tabel 4.26** dan **Tabel 4.27** yang diblok warna abu-abu. Karena nilai dari BER_{sistem} pada titik-titik tersebut melebihi batas toleransi nilai BER maksimum untuk LTE yaitu 10^{-3} . Apabila ditelaah kembali nilai-nilai yang tidak sesuai tersebut rata-rata terdapat pada kisaran jarak atau panjang serat optik 45-50 km, hal ini terjadi karena pada jarak tersebut sudah dibutuhkan suatu penguat atau EDFA untuk meningkatkan performansi suatu serat optik (Becker. P.C., 1999). Dan hal ini tidak dibahas dalam skripsi ini karena di luar batasan yang telah dibuat. Selain itu, nilai-nilai yang tidak sesuai tersebut tidak terjadi pada panjang gelombang 1550 nm. Hal ini juga membuktikan bahwa pada panjang gelombang ini lebih unggul dibandingkan dengan dua lainnya dalam sistem ini. Selain itu nilai BER yang tidak sesuai juga terjadi paling minimum pada teknik modulasi 64-QAM, sekaligus membuktikan bahwa teknik modulasi ini memberikan performansi terbaik untuk sistem RoF ini.



BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan dapat disimpulkan bahwa :

1. Dari antara tiga teknik modulasi yang digunakan yaitu QPSK, 16-QAM dan 64-QAM, nilai SNR_{sistem} rata-rata tertinggi adalah pada teknik modulasi 64-QAM dan terendah pada QPSK. Dengan nilai tertinggi pada teknik modulasi 64-QAM jarak 25 km dengan panjang gelombang 1550 nm dan CP = 0,2 yaitu 34,4036 dB dan nilai terendah adalah 0,7674 dB pada jarak 50 km dengan panjang gelombang 1310 nm dan CP = 0,0729 di teknik modulasi QPSK.
2. Semakin panjang serat optik yang digunakan, nilai SNR_{sistem} semakin kecil baik pada teknik modulasi QPSK, 16-QAM maupun 64-QAM.
3. Pada ketiga teknik modulasi yang digunakan didapatkan nilai SNR sistem untuk panjang gelombang 1550 nm lebih tinggi dibandingkan SNR untuk panjang gelombang 1480 nm dan 1310 nm. Pada teknik modulasi 64-QAM nilai SNR_{sistem} tertinggi untuk panjang gelombang 1550 nm adalah 34,4036 dB sedangkan untuk panjang gelombang 1490 nm adalah 32,4036 dB dan pada panjang gelombang 1310 nm adalah 26,9036 dB.
4. Pada tiga teknik modulasi yang digunakan SNR_{sistem} memiliki performansi terbaik pada saat CP yang digunakan adalah 0,2 dibandingkan dengan CP = 0,0729
5. Pada tiga teknik modulasi yang digunakan, semakin panjang serat optik yang digunakan, nilai kapasitas kanal semakin kecil. kapasitas kanal tertinggi adalah 319,29 Gbps pada panjang serat optik 25 km dengan CP = 0,2 teknik modulasi 64-QAM panjang gelombang 1550 nm, sedangkan nilai kapasitas kanal terendah adalah 1,27 Gbps yang terjadi saat panjang gelombang 1310 nm pada panjang serat optik 50 km teknik modulasi QPSK pada kedua CP yang digunakan.
6. Panjang gelombang 1550 nm menghasilkan nilai kapasitas kanal rata-rata yang lebih besar dengan kapasitas kanal pada panjang gelombang 1490 nm dan 1310 nm. Baik pada teknik modulasi QPSK, 16-QAM ataupun 64-QAM
7. Pada CP = 0,2 kapasitas kanal mencapai nilai lebih baik dibandingkan dengan penggunaan CP = 0,0729 baik pada teknik modulasi QPSK, 16-QAM maupun 64-QAM.
8. Nilai rata-rata kapasitas kanal pada simulasi ini mencapai nilai terbaik pada saat teknik modulasi yang digunakan adalah 64-QAM dibandingkan dengan QPSK dan 16-QAM. Nilai maksimumnya adalah 319,29 Gbps.
9. Semakin panjang serat optik yang digunakan, nilai *bit rate* akan semakin kecil.

10. Dari ketiga teknik modulasi yang digunakan nilai *bit rate* tertinggi ialah saat panjang gelombang 1310 nm, tetapi perubahan nilainya mendekati konstan.
11. Nilai BER_{sistem} akan semakin tinggi seiring dengan semakin panjang serat optik yang digunakan baik pada teknik modulasi QPSK, 16-QAM maupun 64-QAM. Nilai BER_{sistem} tertinggi pada simulasi ini adalah $1,64 \times 10^{-3}$ terjadi di panjang serat optik 35 km, CP = 0,2, panjang gelombang 1310 nm dan teknik modulasi QPSK. Dan nilai terendah BER_{sistem} adalah $1,97 \times 10^{-12}$ terjadi di panjang serat optik 25 km, CP = 0,0729, panjang gelombang 1550 nm dan teknik modulasi 64-QAM.
12. Nilai BER_{sistem} untuk panjang gelombang 1550 nm menunjukkan performa terbaik dibanding panjang gelombang 1490 nm dan 1310 nm karena nilai rata-ratanya terkecil dibandingkan dua lainnya dan tidak ada kemunculan nilai BER_{sistem} yang melebihi batas toleransi BER_{sistem} pada LTE.
13. Nilai rata-rata BER_{sistem} mencapai nilai terbaiknya saat CP yang digunakan ialah 0,0729 di tiga teknik modulasi yang digunakan, meskipun perbedaannya relatif kecil dengan CP = 0,2.
14. Ditinjau dari rata-rata nilai BER_{sistem} nya teknik modulasi 64-QAM adalah yang paling bagus dibandingkan dengan QPSK dan 16-QAM. Selain nilai rata-rata BER_{sistem} nya terkecil, pada teknik modulasi 64-QAM kemunculan nilai BER_{sistem} pada jarak tertentu yang tidak sesuai dengan toleransi pada teknologi LTE yaitu 10^{-3} menunjukkan paling minimum dibandingkan dua lainnya.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan adalah :

1. Menganalisa pengaruh SC-FDMA pada RoF dengan jarak atau panjang serat optik yang lebih panjang lagi sehingga memerlukan adanya pemasangan penguat (*amplifier*) untuk ditambahkan dalam perhitungannya.
2. Menganalisa pengaruh SC-FDMA pada RoF tetapi dengan propagasi *indoor*.

DAFTAR PUSTAKA

- Ergen, Mustafa. 2009. *Mobile Broadband Including WiMAX and LTE*. United States : Springer.
- Fernando, Xavier. 2009. *Radio over Fiber-An Optical Technique for Wireless Access*. IEEE Communications Society.
- Fernando, Xavier dan AlaganAnpalagan. 2004. *On The Design of Optical Fiber Based Wireless Access Systems*. IEEE Communication Society, Vol. 14, No. 2, pp. 3550-3555.
- Francisca, M., et al. 2007. "Transmission of IEEE802.16d WiMAX signals over radio-over-fibre IMDD links", Valencia (Spain)
- Hara, Shisuke, RamjeePrasaad. (2003). *Multicarrier technique for 4G mobile communications*. London : Artech House
- Holma,Harry and Anti Toskala . 2007. *LTE for UMTS – OFDMA and SCFDMA Based Radio Access*. UK : British
- Hyung G. Myung. Mei 2008. *Single Carrier FDMA*.
- Hyung G. Myung. Mei 2008. *Technical Overview of 3GPP LTE*<http://www.3gpp.com>
- Khan, Farooq. 2009. *LTE for 4G Mobile Broadband*. Cambridge University Press.
- Mohamed,Abd El-Naser A., et al. (2011). *High transmission performance of radio over fiber systems over traditional optical fiber communication systems using different coding.formats for long haul applications*. International Journal of Advances in Engineering & Technology (IJAET), ISSN: 2231-1963.
- Ng'oma, A. 2002. "Design of a Radio-over-Fibre System for Wireless LANs", TechnischeUniversiteit Eindhoven
- PT. IXIA. November 2009. *Single Carrier Frequency Division Multiple Access in LTE*.Calabaras.<http://www.ixia.com/>
- R. Prasad and S. Hara. Sept 1996. *An Overview of Multi-Carrier CDMA Proceedings of IEEE 4th International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications*, Vol 1, pp. 22-25.
- Rakhmania, AmaliaEka. 2011. *Performasi Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) pada Tekonologi Radio over Fiber (ROF)*. Skripsi tidak dipublikasikan. Malang: Universitas Brawijaya.

Riyansyah, Deris. 2010. *Long Term Evolution (LTE) dan Komponen BTS (Base Transceiver Station)*. Universitas Indonesia.

Rumney, Moray. 2008. *3GPP LTE: Introducing Single-Carrier FDMA*. USA

Stefania Sesia, Issam Toufik, Matthew Bakker. 2009. *LTE – The UMTS Long Evolution (From Theory to Practice)*. UK: British



LAMPIRAN 1

LISTING PROGRAM MATLAB UNTUK MENGHITUNG SNR SISTEM DAN MENAMPILKAN GRAFIKNYA

```
L=25:5:50 %panjang fiber
PRFin=(10^(3.5))/1000; %W
x=sqrt(2*(PRFin));
lambda=[1310;1490;1550];
alfa1=0.35; %dB/km
alfa2=0.24; %dB/km
alfa3=0.2 ;%dB/km
P0 = 0.5 ;%W
rho = 0.75 ;
m = 0.7 ;
nc=2 ;
lc=0.5 ;
ns=(L/5)-1 ;
ls=0.5 ;
OL1=2*((alfa1.*L) + (nc*lc) +(ns*ls)) ;
OL2=2*((alfa2.*L) + (nc*lc) +(ns*ls)) ;
OL3=2*((alfa3.*L) + (nc*lc) +(ns*ls)) ;
Lop1 = 10.^(-OL1/10);
Lop2 = 10.^(-OL2/10);
Lop3 = 10.^(-OL3/10);
Id= rho*((1+m*(x))*P0 ;%A
q= 1.6*10^(-19) ;
BW1=3.6051 * 10^6 ;
BW2=3.6036 * 10^6 ;
Ishot1 =(2*q*Id.*BW1);
Ishot2 =(2*q*Id.*BW2);
k = 1.38*10^(-23) ;
T=300 ;
R1=50 ;
Ith1 = (4*k*T.*BW1/R1) ;
Ith2 = (4*k*T.*BW2/R1) ;
PRIN = 10^(-155/10) ;
Irin1 =(sqrt(PRIN*Id*Id.*BW1));
Irin2 =(sqrt(PRIN*Id*Id.*BW2));
nop1=(Ishot1+Ith1+Irin1) ;
nop2=(Ishot2+Ith2+Irin2) ;
f= 2600000000; %frekuensi kerja (Hz)
d1 = 1400; %jarak pemancar ke penerima (m) --> radius QPSK
d2 = 1150; %jarak pemancar ke penerima (m) --> radius 16-QAM
d3 = 900; %jarak pemancar ke penerima (m) --> radius 64-QAM
d0 = 100; %jarak referensi
s = 9.6; %shadow (dB)
a=4;
b= 0.0065;
c=17.1;
hb=1.5; %tinggi antenna UE (m)
h = 50; %tinggi antenna node B (m)
A1= 10*(log10(4*pi*f*d1/300000000));
A2= 10*(log10(4*pi*f*d2/300000000));
A3= 10*(log10(4*pi*f*d3/300000000));
gamma = (a-(b*hb)+ (c/hb));
deltaPLf = (6*(log10(f/2000)));
deltaPLh= ((-10.8)*(log10 (h/2)));
```

```

Le11 = 10^-((A1 + (10*gamma*log10 (d1/d0))+ s + deltaPLf + deltaPLh)/10)
;
Le12 = 10^-((A2 + (10*gamma*log10 (d2/d0))+ s + deltaPLf + deltaPLh)/10)
;
Le13 = 10^-((A3 + (10*gamma*log10 (d3/d0))+ s + deltaPLf + deltaPLh)/10)
;
nel1=10^-((10*(log10 (k*T))+10*(log10 (BW1))+ 2)/10);
nel2=10^-((10*(log10 (k*T))+10*(log10 (BW2))+ 2)/10);
Gop=100 ;
SNR1 = (m^2)*(Id^2)*PRFin*Lop1./(nop1+ (nel1*((Le11/Gop)^2)));
SNR2 = (m^2)*(Id^2)*PRFin*Lop2./(nop1+ (nel1*((Le11/Gop)^2)));
SNR3 = (m^2)*(Id^2)*PRFin*Lop3./(nop1+ (nel1*((Le11/Gop)^2)));
SNRb1= 10.*log10 (SNR1);
SNRb2= 10.*log10 (SNR2);
SNRb3= 10.*log10 (SNR3);
plot (L,SNRb1,'r-^', L,SNRb2,'b-o',L,SNRb3,'g-*' )
grid on
xlabel('panjang serat optik (km)')
ylabel('SNR (dB)')
title('Grafik Pengaruh Panjang Serat Optik Terhadap SNR sistem QPSK
CP=0,0729')
legend('\lambda = 1310 nm', '\lambda = 1490 nm', '\lambda = 1550 nm')

```



LAMPIRAN 2

LISTING PROGRAM MATLAB UNTUK MENGHITUNG NILAI KAPASITAS KANAL DAN MENAMPILKAN GRAFIKNYA

```

L = 25:5:50;    %panjang fiber
Dm1 = -0.62;%lamda = 1310 nm
Dm2 = 12.77;%lamda = 1490 nm
Dm3 = 16.33; %lamda = 1550 nm
dlamda=0.1
tmat1 = Dm1 *dlamda*L
tmat2 = Dm2 *dlamda*L
tmat3 = Dm3 *dlamda*L
tsumber = 16;
treceiver = 25;
tsistem1 = sqrt((tsumber^2)+(treceiver^2)+(tmat1.^2))
tsistem2 = sqrt((tsumber^2)+(treceiver^2)+(tmat2.^2))
tsistem3 = sqrt((tsumber^2)+(treceiver^2)+(tmat3.^2))
BWSig1 = 0.44*10^3./(tsistem1.*L)
BWSig2 = 0.44*10^3./(tsistem2.*L)
BWSig3 = 0.44*10^3./(tsistem3.*L)
PRFin= (10^(3.5))/1000 %W
x=sqrt(2*(PRFin))
Gm = 0.12 %mW/mA
alfa1=0.35 %dB/km
alfa2 = 0.24 %dB/km
alfa3 = 0.2 %dB/km
P0 = 0.5 %W
rho = 0.75
m = 0.7
nc=2
lc=0.5
ns=(L/5)-1
if ns<0
ns=0
else
ns=ns
end
ls=0.5
OL1=2*((alfa1.*L) + (nc*lc) +(ns*ls))
OL2=2*((alfa2.*L) + (nc*lc) +(ns*ls))
OL3=2*((alfa3.*L) + (nc*lc) +(ns*ls))
Lop1 = 10.^(-OL1/10)
Lop2 = 10.^(-OL2/10)
Lop3 = 10.^(-OL3/10)
Id= rho*((1+m*(x))*P0 %A
q= 1.6*10^(-19)
BW1=3.6051 * 10^6 ;
BW2=3.6036 * 10^6 ;
Ishot1 =(2*q*Id.*BW1)
Ishot2 =(2*q*Id.*BW2)
k = 1.38*10^(-23)
T=300
R1=50
Ith1 = (4*k*T.*BW1/R1)
Ith2 = (4*k*T.*BW2/R1)
PRIN = 10^(-155/10)
Irin1 =(sqrt(PRIN*Id*Id.*BW1))

```



```

Irin2 =(sqrt(PRIN*Id*Id.*BW2))
nop1=(Ishot1+Ith1+Irin1)
nop2=(Ishot2+Ith2+Irin2)
f= 2600000000; %frekuensi kerja (Hz)
d1 = 1400; %jarak pemancar ke penerima (m) --> radius QPSK
d2 = 1150; %jarak pemancar ke penerima (m) --> radius 16-QAM
d3 = 900; %jarak pemancar ke penerima (m) --> radius 64-QAM
d0 = 100; %jarak referensi
s = 9.6; %shadow (dB)
a=4;
b= 0.0065;
c=17.1;
hb=1.5; %tinggi antenna BS (m)
h = 50; %tinggi antenna MS (m)
A1= 10*(log10(4*pi*f*d1/300000000));
A2= 10*(log10(4*pi*f*d2/300000000));
A3= 10*(log10(4*pi*f*d3/300000000));
gamma = (a-(b*hb)+ (c/hb));
deltaPLf = (6*(log10(f/2000)));
deltaPLh= ((-10.8)*(log10 (h/2)));
Lel1 = 10^-((A1 + (10*gamma*log10 (d1/d0))+ s + deltaPLf + deltaPLh)/10)
;
Lel2 = 10^-((A2 + (10*gamma*log10 (d2/d0))+ s + deltaPLf + deltaPLh)/10)
;
Lel3 = 10^-((A3 + (10*gamma*log10 (d3/d0))+ s + deltaPLf + deltaPLh)/10)
;
nell1=10^-((10*(log10 (k*T))+10*(log10 (BW1))+ 2)/10);
nell2=10^-((10*(log10 (k*T))+10*(log10 (BW2))+ 2)/10);
Gop=100
SNR1 = (m^2)*(Id^2)*PRFin*Lop1./(nop1+ (nell1*((Lel1/Gop)^2)));
SNR2 = (m^2)*(Id^2)*PRFin*Lop2./(nop1+ (nell1*((Lel1/Gop)^2)));
SNR3 = (m^2)*(Id^2)*PRFin*Lop3./(nop1+ (nell1*((Lel1/Gop)^2)));
SNRb1= 10.*log10 (SNR1);
SNRb2= 10.*log10 (SNR2);
SNRb3= 10.*log10 (SNR3);
C1= BWSig1.*log2(1+10.^(SNR1/10)) %kapasitas kanal untuk lamda = 1310 nm
C2= BWSig2.*log2(1+10.^(SNR2/10)) %kapasitas kanal untuk lamda = 1490 nm
C3= BWSig3.*log2(1+10.^(SNR3/10)) %kapasitas kanal untuk lamda = 1550 nm
plot (L,C1,'r', L,C2, 'b',L,C3,'g')
gridon
xlabel('panjang serat optik (km)')
ylabel('Kapasitas Kanal (Gbps)')
title('Grafik Pengaruh Panjang Serat Optik Terhadap Kapasitas Kanal QPSK
CP=0,0729')
legend('\lambda = 1310 nm','\lambda = 1490 nm','\lambda = 1550 nm')

```


LAMPIRAN 3

LISTING PROGRAM MATLAB UNTUK MENGHITUNG *BIT RATE* DAN MENAMPILKAN GRAFIKNYA

```
L = 25:5:50;    %panjang fiber
Dm1 =0.62;%lamda = 1310 nm
Dm2 =12.77;%lamda = 1490 nm
Dm3 =16.33; %lamda = 1500 nm
dlamda=0.1
tmat1 = -Dm1 *dlamda*L
tmat2 = -Dm2 *dlamda*L
tmat3 = -Dm3 *dlamda*L
tsumber = 16;
treceiver = 25;
tsistem1 = sqrt((tsumber^2)+(treceiver^2)+(tmat1.^2))
tsistem2 = sqrt((tsumber^2)+(treceiver^2)+(tmat2.^2))
tsistem3 = sqrt((tsumber^2)+(treceiver^2)+(tmat3.^2))
BR1 = 0.7./(tsistem1*10^-3)    %Bit Rate untuk ? = 1310 nm (bps)
BR2 = 0.7./(tsistem2*10^-3)    % Bit Rate untuk ? = 1490 nm (bps)
BR3 = 0.7./(tsistem3*10^-3)    % Bit Rate untuk ? = 1550 nm (bps)
plot (L,BR1,'r', L,BR2, 'b', L,BR3, 'g')
gridon
xlabel('panjang serat optik (km)')
ylabel('Bit Rate (Gbps)')
title('Grafik Pengaruh Panjang Serat Optik Terhadap Bit Rate Sistem')
legend('\lambda = 1310 nm', '\lambda = 1490 nm', '\lambda = 1550 nm')
```

LAMPIRAN 4

LISTING PROGRAM MATLAB UNTUK MENGHITUNG NILAI BER SISTEM DAN MENAMPILKAN GRAFIKNYA

```
L = 25:0.1:50; %panjang fiber
PRFin= (10^(3.5))/1000 %W
x=sqrt(2*(PRFin))
Gm = 0.12 %mW/mA
alfa1=0.35 %dB/km
alfa2 = 0.24 %dB/km
alfa3 = 0.2 %dB/km
P0 = 0.5 %W
rho = 0.75
m = 0.7
nc=2
lc=0.25
ns=(L/5)-1
if ns<0
ns=0
else
ns=ns
end
ls=0.5
OL1=2*((alfa1.*L) + (nc*lc) +(ns*ls))
OL2=2*((alfa2.*L) + (nc*lc) +(ns*ls))
OL3=2*((alfa3.*L) + (nc*lc) +(ns*ls))
Lop1 = 10.^(-OL1/10)
Lop2 = 10.^(-OL2/10)
Lop3 = 10.^(-OL3/10)
Id= rho*((1+m*(x))*P0 %A
q= 1.6*10^(-19)
BW1=3.6051 * 10^6 ;
BW2=3.6036 * 10^6 ;
Ishot1 =(2*q*Id.*BW1)
Ishot2 =(2*q*Id.*BW2)
k = 1.38*10^(-23)
T=300
R1=50
Ith1 = (4*k*T.*BW1/R1)
Ith2 = (4*k*T.*BW2/R1)
PRIN = 10^(-155/10)
Irin1 =(sqrt(PRIN*Id*Id.*BW1))
Irin2 =(sqrt(PRIN*Id*Id.*BW2))
nop1=(Ishot1+Ith1+Irin1)
nop2=(Ishot2+Ith2+Irin2)
f= 2600000000; %frekuensi kerja (Hz)
d1 = 1400; %jarak pemancar ke penerima (m) --> radius QPSK
d2 = 1150; %jarak pemancar ke penerima (m) --> radius 16-QAM
d3 = 900; %jarak pemancar ke penerima (m) --> radius 64-QAM
d0 = 100; %jarak referensi
s = 9.6; %shadow (dB)
a=4;
b= 0.0065;
c=17.1;
hb=1.5; %tinggi antenna BS (m)
h =50; %tinggi antenna MS (m)
A1= 10*(log10(4*pi*f*d1/300000000));
A2= 10*(log10(4*pi*f*d2/300000000));
A3= 10*(log10(4*pi*f*d3/300000000));
gamma = (a-(b*hb)+( c/hb));
deltaPLf = (6*(log10(f/2000)));
```



```

deltaPLh= ((-10.8)*(log10 (h/2)));
Le11 = 10^-((A1 + (10*gamma*log10 (d1/d0))+ s + deltaPLf + deltaPLh)/10)
;
Le12 = 10^-((A2 + (10*gamma*log10 (d2/d0))+ s + deltaPLf + deltaPLh)/10)
;
Le13 = 10^-((A3 + (10*gamma*log10 (d3/d0))+ s + deltaPLf + deltaPLh)/10)
;
nel1=10^-((10*(log10 (k*T))+10*(log10 (BW1))+ 2)/10);
nel2=10^-((10*(log10 (k*T))+10*(log10 (BW2))+ 2)/10);
Gop=100
SNR1 = (m^2)*(Id^2)*PRFin*Lop1./(nop1+ (nel1*((Le11/Gop)^2)));
SNR2 = (m^2)*(Id^2)*PRFin*Lop2./(nop1+ (nel1*((Le11/Gop)^2)));
SNR3 = (m^2)*(Id^2)*PRFin*Lop3./(nop1+ (nel1*((Le11/Gop)^2)));
SNRb1= 10.*log10 (SNR1);
SNRb2= 10.*log10 (SNR2);
SNRb3= 10.*log10 (SNR3);
BER1= 0.5*10^5*erfc(sqrt(SNRb1))
BER2= 0.5*10^5*erfc(sqrt(SNRb2))
BER3= 0.5*10^5*erfc(sqrt(SNRb3))
plot(L,BER1,'r', L,BER2,'b', L,BER3,'g' )
grid on
xlabel('panjang serat optik (km)')
ylabel('BER ( x 10^-^5)')
title('Grafik Pengaruh Panjang Serat Optik pada QPSK Terhadap BER sistem
dengan CP = 0,0729')
legend('\lambda = 1310 nm', '\lambda = 1490 nm', '\lambda = 1550 nm')

```



LAMPIRAN 5

SPEKIFIKASI SERAT OPTIK CORNING COMPANY

Corning® SMF-28e+® Photonic Optical Fiber

CORNING



*A full spectrum fiber
for components and
assemblies with
tighter geometry for
more consistent
splicing*

*Corning's SMF28e+
photonic fiber provides
further evidence of
Corning's long history of
service to original
equipment
manufacturers (OEMs).
This fiber's attributes are
specifically customized for
optical connectorization
and component
applications, allowing
OEMs to reduce
manufacturing costs,
standardize processes, and
improve performance.*

Applications:

- Connectors
- EDFA
- Couplers
- Pigtails
- DWDM components
- Other components

Features:

- Industry-leading optical and geometry specifications
- Exceptional performance and splice-ability
- Suitable for all transmission systems and fully compatible with SMF-28e+® optical fiber, the world's most widely demanded full-spectrum fiber
- In compliance with, or exceeds the industry's most stringent requirements including:
 - ITU-T Recommendations G.652 (Tables A, B, C & D)
 - IEC Specifications 60793-2-50 Type B1.3
 - TIA/EIA 492-CAAB
 - Telcordia Generic Requirements GR-20-Core
 - ISO 11801 OS2
- Improved macro-bend specification from less than 0.05 dB to less than 0.03 dB, allowing better handling and ease of installation
- Tighter zero dispersion wavelength specification
- New coating for improved micro-bending
- Smaller coating outside diameter (242 μm nominal) for improved usage in ribbon applications

SMF-28e+^o Photonic

Optical Specifications

Fiber Cutoff Wavelength (λ_{cutoff})	≤ 1280 nm	
Maximum Attenuation	Wavelength (nm)	Maximum Value* (dB/km)
	1310	< 0.35
	$1383 \pm 3^{**}$	≤ 0.35
	1490	≤ 0.24
	1550	≤ 0.20
	1625	≤ 0.23

* Maximum specified attenuation value available within the stated ranges

** Attenuation post-hydrogen aging according to IEC 60793-2-50 Section C.5 for B.1.3 fibers.

Mode-field Diameter	Wavelength (nm)	MFD (μm)
	1310	9.2 ± 0.4
	1550	10.4 ± 0.5

Dispersion	Wavelength (nm)	Dispersion Value [ps/(nm ² ·km)]
		1550
	1625	≤ 22.0

Zero Dispersion Wavelength (λ_0): $1304 \text{ nm} \leq \lambda_0 \leq 1324 \text{ nm}$

Zero Dispersion Slope (S_0): $< 0.088 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$

Polarization Mode Dispersion (PMD)	Value (ps/ $\sqrt{\text{km}}$)
PMD Link Design Value	$\leq 0.06^*$
Maximum Individual Fiber	≤ 0.1

* Complies with IEC 60794-3, 2001, Section 5.5, Method 1, September 2001

The PMD link design is a term used to describe the PMD of concatenated lengths of fiber (also known as PMD₀). This value represents a statistical upper limit for total PMD. Individual PMD values may change when fiber is cabled. Corning's fiber specification supports network design requirements for 0.5 ps/ $\sqrt{\text{km}}$ maximum PMD.

Point Discontinuity	Wavelength (nm)	Point Discontinuity (dB)
		1310
	1550	≤ 0.05



SMF-28e+[®] Photonic

Key Geometric, Mechanical and Environmental Specifications

Cladding Diameter (μm)	125.0 ± 0.3
Core-Clad Concentricity (μm)	≤ 0.3
Cladding Non-Circularity (%)	≤ 0.7
Core Diameter (μm)	8.2
Coating Diameter (μm)	242 ± 5
Coating-Cladding Concentricity (μm)	< 12
Coloring Diameter* (μm)	250 +15/-9
Fiber Curl (m)	≥ 5.0 radius of curvature

* If applicable

Environmental Test	Test Condition	Induced Attenuation 1310 nm, 1550 nm & 1625 (dB/km)
Temperature Dependence (°C)	-60 to 85 *	≤ 0.05
Temperature-Humidity Cycling (°C)	-10 to 85 * up to 98% RH	≤ 0.05
Water Immersion (°C)	23 * ± 2	≤ 0.05
Dry Heat Soak (°C)	85 * ± 2	≤ 0.05
Damp Heat (°C)	85 * at 85% RH	≤ 0.05
Operating Temperature Range (°C)	-60 to 85	
Proof Test (kpsi)	≥ 200	
Lengths	Available up to 50.4 km per spool	

* Reference temperature: 23°C

Performance Characterizations*

Numerical Aperture	0.12		
Refractive Index Difference (%)	0.36		
Effective Group Index of Refraction (N _{eff})	1.4670 @ 1310 nm		
	1.4677 @ 1550 nm		
Fatigue Resistance Parameter (N _f)	20		
Coating Strip Force	Dry: 0.6 lb. (3N)		
	Wet 14 day room temperature: 0.6 lb. (3N)		
Rayleigh Backscatter Coefficient	-77 dB @ 1310 nm		
	-82 dB @ 1550 nm		
Macro Bend Loss			
Mandrel Diameter (mm)	Number of Turns	Wavelength	Induced Attenuation** (dB)
32	1	1550	≤ 0.03
50	100	1310	≤ 0.03
50	100	1550	≤ 0.03
60	100	1625	≤ 0.03

* Values in this table are nominal or calculated values

** The induced attenuation due to fiber wrapped around a mandrel of a specified diameter.



The Single-Mode Fiber for Connectors and Components

Corning uses its legendary geometry control and quality leadership to manufacture SMF-28e+® photonic fiber. We focus on tailoring product attributes that allow OEMs to minimize scrap and overall insertion loss while improving active and splice performance. Through precise manufacturing techniques, we assure geometric performance along the entire length of fiber while maintaining nominal mode-field performance.

We proof stress the entire length of SMF-28e+® photonic fiber to ≥ 200 kpsi, which provides OEMs with increased reliability and reduced handling concerns. In addition, we specify a fiber cutoff wavelength of 1280 nm, enabling operability at both 1310 nm and 1550 nm in bare fiber applications.

Designed for Versatility and Performance

For better understanding of the applicable value to customers, Corning has completed studies using active and passive alignment techniques as well as modeled results. This research shows that significant splice performance improvement can result from focusing on nominal geometry performance and reducing deviation of a fiber's core-clad concentricity, cladding diameter, cladding non-circularity and fiber curl. This improvement minimizes high-loss outliers and reduces the average splice loss, contributing to maximized OEM process efficiencies.

Corning manufactures the family of SMF-28e+® fibers using an Outside Vapor Deposition (OVD) process, which produces a totally synthetic, ultra-pure fiber. As a result, Corning fibers have consistent geometric properties, high strength, and low attenuation. OEMs can count on Corning SMF-28e+® photonic fiber to deliver excellent performance and reliability, reel after reel. Measurement methods comply with ITU recommendations G650, IEC 60793-1, and Telcordia GR20-CORE.

Formulas

Dispersion:

$$D(\lambda) \approx \frac{S_0}{4} \left[\lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right] \text{ ps/(nm}\cdot\text{km)}$$

For 1200 nm ≤ λ ≤ 1625 nm

Cladding Non Circularity:

$$\frac{\text{Cladding}}{\text{Non - Cladding}} = \left[1 - \frac{\text{MinCladdingDiameter}}{\text{MaxCladdingDiameter}} \right] \times 100$$

For more information about Corning's leadership in Specialty Fiber technology visit our website at www.corning.com/specialtyfiber

To obtain additional technical information, an engineering sample or to place an order for this product, please contact us at:

Corning Incorporated

Tel: +1-607-974-9974

© 2010 Corning Incorporated

Fax: +1-607-974-4122

E-mail: specialtyfiber@corning.com



