

**ANALISIS PENGARUH PENGGUNAAN ANTENA JAMAK  
MIMO 2x2, SIMO 1x2, DAN SISO 1x1 TERHADAP  
PERFORMANSI *ORTHOGONAL FREQUENCY DIVISION  
MULTIPLE ACCESS (OFDMA)* PADA TEKNOLOGI RADIO  
*OVER FIBER (RoF)***

**SKRIPSI  
KONSENTRASI TEKNIK TELEKOMUNIKASI**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun Oleh :

**ALFI ZUHRIYA KHOIRUNNISAA  
NIM: 0910630004 - 63**

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

## LEMBAR PERSETUJUAN

# ANALISIS PENGARUH PENGGUNAAN ANTENA JAMAK MIMO 2x2, SIMO 1x2, DAN SISO 1x1 TERHADAP PERFORMANSI *ORTHOGONAL FREQUENCY DIVISION MULTIPLE ACCESS (OFDMA)* PADA TEKNOLOGI *RADIO OVER FIBER (RoF)*

## SKRIPSI KONSENTRASI TEKNIK TELEKOMUNIKASI

Diajukan untuk memenuhi persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun Oleh :

**ALFI ZUHRIYA KHOIRUNNISAA**  
**NIM: 0910630004-63**

Telah diperiksa dan disetujui oleh

**Dosen Pembimbing I**

**Dosen Pembimbing II**

**Ir. Endah Budi Purnomowati.,MT**  
**NIP. 19621116 198903 2 002**

**Ali Mustofa, ST., MT.**  
**NIP. 19710601 200003 1 001**

## LEMBAR PENGESAHAN

# ANALISIS PENGARUH PENGGUNAAN ANTENA JAMAK MIMO 2x2, SIMO 1x2, DAN SISO 1x1 TERHADAP PERFORMANSI *ORTHOGONAL FREQUENCY DIVISION MULTIPLE ACCESS (OFDMA)* PADA TEKNOLOGI *RADIO OVER FIBER (RoF)*

Disusun Oleh :

**ALFI ZUHRIYA KHOIRUNNISAA**  
**NIM: 0910630004-63**

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus  
pada tanggal **23 April 2013**

Majelis Penguji :

**Rudy Yuwono, ST., MSc.**  
**NIP. 19710615 199802 1 003**

**Dwi Fadilla Kurniawan, S.T., M.T**  
**NIP. 19720630 200003 1 002**

**M. Fauzan Edy Purnomo, ST.,MT.**  
**NIP. 19710609 200003 1 005**

Mengetahui :  
**Ketua Jurusan Teknik Elektro**

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

## PENGANTAR

Alhamdulillah, segenap puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat, hidayah, dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul “Analisis Pengaruh Penggunaan Antena Jamak MIMO 2x2, SIMO 1x2 dan SISO 1x1 terhadap Performansi *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA) dengan Teknologi *Radio over Fiber* (RoF)” yang diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan memperoleh gelar Sarjana Teknik. Tidak lupa pula shalawat serta salam selalu penulis sampaikan kepada junjungan besar Nabi Muhammad SAW yang telah membawa kita menuju ke jalan yang terang.

Skripsi ini menganalisis performansi OFDMA pada teknologi RoF dengan parameter performansi yang diamati adalah *signal to noise ratio*, kapasitas kanal, *bit error rate* dan *link power budget* sistem menggunakan antena jamak MIMO 2x2, SIMO 1x2 dan SISO 1x1.

Pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada berbagai pihak yang telah membantu dan mendukung dalam penyelesaian skripsi ini, yaitu :

1. Keluarga tercinta, Ibunda Titin Rustini, Ayahanda Masjhari atas segala do'a, dukungan secara moril dan material, kasih sayang dan kepercayaan yang telah diberikan selama ini. Kedua adikku tersayang Evada Aulia Azhari dan Sabila Zahra Umamy terimakasih atas segala semangat, dukungan dan do'anya 'kita harus selalu membuat bangga bapak ibu', serta keluarga besar atas do'a yang tak pernah henti, 'You are my everything'.
2. Bapak Dr. Ir. Sholeh Hadi Pramono, MS. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro dan Bapak M. Aziz Muslim, ST. MT., Ph.D, selaku Sekretaris Jurusan Teknik Elektro.
3. Ibu Ir.Endah Budi Purnomowati.,MT dan Bapak Ali Mustofa., S.T., M.T selaku dosen pembimbing skripsi yang banyak memberikan saran, konsultasi, kesabaran, motivasi dan waktu dalam penyusunan skripsi ini.
4. Bapak Ali Mustofa S.T., M.T, selaku KKDK konsentrasi telekomunikasi dan Dosen Penasehat Akademik yang banyak memberikan pengarahan serta bimbingan akademik.
5. Bapak M. Fauzan Edy P. S.T., M.T selaku Kepala Laboratorium Telekomunikasi dan Mas Iswanto, ST. selaku laboran.

6. Bapak dan Ibu dosen serta segenap staf dan karyawan Jurusan Teknik Elektro.
7. Amalia Eka Rakhmania, Fidela Restantia dan Nurlita Yanuarni yang telah memberikan inspirasi kepada penulis dalam melakukan penelitian pada skripsi ini.
8. Rifial Ridho Assidiqi yang telah banyak memberikan do'a, semangat, saran dan motivasi selama penyusunan skripsi ini "You make me do my best, thanks"
9. Sahabat-sahabat terbaikku : Rosa, Jumi, Desinta, Warda, Pepy, Dista, Nisa, Bayu dan Ardent, keluarga besar Angkatan 2009 (AMPERE '09) terutama Paket C 2009 kalian semua adalah sebuah kisah klasik untuk masa depan, semoga cita-cita kita semua tercapai kawan.
10. Rekan-rekan asisten Laboratorium Telekomunikasi angkatan 2008, 2009, dan 2010 atas persahabatan, kekeluargaan serta kerjasamanya selama ini.
11. Teman-teman kos Kertoleksono 19 A, terimakasih atas kekeluargaan, do'a dan dukungan selama ini.
12. Dan untuk semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu-persatu.

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, Mei 2013

Penulis

DAFTAR ISI

	halaman
<b>PENGANTAR</b> .....	i
<b>DAFTAR ISI</b> .....	iii
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	v
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	vii
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	viii
<b>ABSTRAK</b> .....	ix
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	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
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	6
2.1 <i>Long Term Evolution</i> (LTE).....	6
2.1.1 Spesifikasi <i>Long Term Evolution</i> (LTE) .....	6
2.2 Arsitektur <i>Long Term Evolution</i> (LTE) .....	7
2.3 <i>Radio over Fiber</i> (RoF).....	9
2.4 Arsitektur <i>Radio over Fiber</i> .....	12
2.5 Kelebihan dan Kekurangan <i>Radio over Fiber</i> .....	17
2.5.1 Kelebihan <i>Radio over Fiber</i> .....	17
2.5.2 Kekurangan <i>Radio over Fiber</i> .....	18
2.6 Aplikasi Teknologi <i>Radio over Fiber</i> .....	19
2.7 <i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i> (OFDMA) .....	20
2.7.1 Pembagian Aliran Data pada OFDMA .....	22
2.7.2 Blok Diagram OFDMA .....	23
2.7.3 Keunggulan dan Kelemahan OFDMA .....	29
2.8 Teknologi Antena Jamak .....	30
2.8.1 <i>Single Input Single Output</i> (SISO).....	31
2.8.2 <i>Single Input Multi Output</i> (SIMO) .....	31
2.8.3 <i>Multi Input Multi Output</i> (MIMO).....	32

2.9 Performansi Sistem MIMO-OFDMA pada Teknologi <i>Radio over Fiber</i> (RoF) .....	35
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN</b> .....	45
3.1 Pengambilan Data .....	45
3.2 Pengolahan Data .....	46
3.3 Pengambilan Kesimpulan dan Saran .....	52
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN</b> .....	53
4.1 Analisis Pengaruh Penggunaan Antena Jamak MIMO 2x2, SIMO 1x2 dan SISO 1x1 terhadap Performansi OFDMA pada RoF untuk Parameter <i>Signal to Noise Ratio</i> (SNR) .....	55
4.2 Analisis Pengaruh Penggunaan Antena Jamak MIMO 2x2, SIMO 1x2 dan SISO 1x1 terhadap Performansi OFDMA pada RoF untuk Parameter Kapasitas Kanal.....	68
4.3 Analisis Pengaruh Penggunaan Antena Jamak MIMO 2x2, SIMO 1x2 dan SISO 1x1 terhadap Performansi OFDMA pada RoF untuk Parameter <i>Bit Error Rate</i> (BER) .....	73
4.4 Analisis Pengaruh Penggunaan Antena Jamak MIMO 2x2, SIMO 1x2 dan SISO 1x1 terhadap Performansi OFDMA pada RoF untuk Parameter <i>Link Power Budget</i> .....	78
<b>BAB V PENUTUP</b> .....	85
5.1 Kesimpulan .....	85
5.2 Saran .....	87
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	88
<b>LAMPIRAN</b> .....	91

## DAFTAR GAMBAR

	halaman
<b>Gambar 2.1</b> Arsitektur Jaringan LTE .....	7
<b>Gambar 2.2</b> Integrasi Jaringan Kabel-Nirkabel .....	10
<b>Gambar 2.3</b> Konsep Sistem <i>Radio over Fiber</i> .....	11
<b>Gambar 2.4</b> <i>Intensity Modulation with Direct Detection</i> (IM-DD) pada Link RoF .....	12
<b>Gambar 2.5</b> Arsitektur <i>Radio over Fiber</i> .....	12
<b>Gambar 2.6</b> Karakteristik Transfer <i>Laser Diode</i> .....	19
<b>Gambar 2.7</b> Perbedaan sinyal OFDM dan OFDMA dalam domain frekuensi dan waktu .....	21
<b>Gambar 2.8</b> Efisiensi Penggunaan <i>Bandwidth</i> pada OFDMA.....	21
<b>Gambar 2.9</b> Pembagian Aliran Data OFDMA .....	22
<b>Gambar 2.10</b> Blok Diagram Sistem OFDMA .....	23
<b>Gambar 2.11</b> Konstelasi Sinyal <i>Quadrature Phase Shift Keying</i> (QPSK). ....	25
<b>Gambar 2.12</b> Sinyal pada <i>Quadrature Phase Shift Keying</i> (QPSK) .....	25
<b>Gambar 2.13a</b> 16-QAM <i>Constellation</i> .....	26
<b>Gambar 2.13b</b> 64-QAM <i>Constellation</i> .....	26
<b>Gambar 2.14</b> Penyisipan <i>Cyclic Prefix</i> pada Simbol OFDMA .....	28
<b>Gambar 2.15</b> Representasi Waktu dari OFDMA.....	28
<b>Gambar 2.16</b> Sistem SISO 1x1 .....	31
<b>Gambar 2.17</b> Sistem SIMO 1x2.....	31
<b>Gambar 2.18</b> Skema <i>Maximal Ratio Combining</i> .....	32
<b>Gambar 2.19</b> Sistem MIMO 2x2 .....	33
<b>Gambar 2.20</b> Skema <i>Spatial Multiplexing</i> .....	34
<b>Gambar 2.21</b> Skema <i>Space Time Block Code</i> (STBC).....	35
<b>Gambar 2.22</b> Blok Diagram <i>Losses</i> , Penguatan, serta <i>Noise</i> pada RoF .....	36
<b>Gambar 2.23</b> Arsitektur MIMO-OFDMA pada <i>Radio over Fiber</i> .....	37
<b>Gambar 3.1</b> Langkah Penyusunan Penelitian .....	45
<b>Gambar 3.2</b> Diagram Alir Perhitungan <i>Signal To Noise Ratio</i> (SNR) Sistem. ....	48
<b>Gambar 3.3</b> Diagram Alir Perhitungan Kapasitas Kanal Sistem.....	49
<b>Gambar 3.4</b> Diagram Alir Perhitungan <i>Bit Error Rate</i> (BER) Sistem .....	50

<b>Gambar 3.5</b>	Diagram Alir Perhitungan <i>Link Power Budget</i> .....	51
<b>Gambar 4.1a</b>	Pemodelan Sistem MIMO 2x2 - OFDMA pada teknologi RoF.....	53
<b>Gambar 4.1b</b>	Pemodelan Sistem SIMO 1x2 - OFDMA pada teknologi RoF	54
<b>Gambar 4.1c</b>	Pemodelan Sistem SISO 1x1 - OFDMA pada teknologi RoF..	54
<b>Gambar 4.2</b>	Pemodelan sistem, Perhitungan SNR .....	55
<b>Gambar 4.3</b>	Grafik Pengaruh Penggunaan Teknik Antena Jamak terhadap SNR sistem pada Jarak yang Berbeda untuk Panjang Gelombang 1550 nm dan 1310 nm.....	66
<b>Gambar 4.4</b>	Pemodelan Perhitungan Kapasitas kanal Sistem.....	68
<b>Gambar 4.5</b>	Grafik Pengaruh Penggunaan Teknik Antena Jamak terhadap Kapasitas Kanal Sistem pada Jarak yang Berbeda untuk Panjang Gelombang 1550 nm dan 1310 nm.....	71
<b>Gambar 4.6</b>	Grafik Pengaruh Penggunaan Teknik Antena Jamak terhadap BER sistem pada Jarak yang Berbeda untuk Panjang Gelombang 1550 nm dan 1310 nm.....	76
<b>Gambar 4.7</b>	Pemodelan Perhitungan <i>Link Power Budget</i> Sistem.....	79
<b>Gambar 4.8a</b>	Grafik Pengaruh Penggunaan Teknik Antena SISO 1x1 terhadap Daya yang Diterima pada Jarak Yang Berbeda untuk Panjang Gelombang 1310 nm dan 1550 nm dengan <i>Gain</i> antena pemancar 16 dBi .....	82
<b>Gambar 4.8b</b>	Grafik Pengaruh Penggunaan Teknik Antena SIMO 1x2 terhadap Daya yang Diterima pada Jarak Yang Berbeda untuk Panjang Gelombang 1310 nm dan 1550 nm dengan <i>Gain</i> antena pemancar 18 dBi.....	82
<b>Gambar 4.8c</b>	Grafik Pengaruh Penggunaan Teknik Antena MIMO 2x2 terhadap Daya yang Diterima pada Jarak Yang Berbeda untuk Panjang Gelombang 1310 nm dan 1550 nm dengan <i>Gain</i> antena pemancar 17 dBi.....	83

## DAFTAR TABEL

	halaman
<b>Tabel 2.1</b> Spesifikasi Teknis LTE.....	6
<b>Tabel 2.2</b> Keluaran Modulator QPSK.....	25
<b>Tabel 2.3</b> Parameter untuk Tipe <i>Terrain</i> yang Berbeda .....	36
<b>Tabel 4.1</b> Spesifikasi LTE <i>release 8</i> .....	57
<b>Tabel 4.2</b> Spesifikasi Teknologi <i>Radio over Fiber</i> .....	57
<b>Tabel 4.3</b> Parameter <i>Data Rate</i> LTE pada Kanal 10 MHz .....	58
<b>Tabel 4.4</b> Hasil Perhitungan <i>Pathloss Wireless</i> Ruang Bebas .....	60
<b>Tabel 4.5</b> Spesifikasi Koefisien Redaman ( $\alpha$ ) .....	61
<b>Tabel 4.6</b> Hasil Perhitungan Rugi-rugi Optik .....	61
<b>Tabel 4.7</b> Hasil Perhitungan SNR sistem Antena Jamak pada <i>Radio over Fiber</i> .....	65
<b>Tabel 4.8</b> Hasil Perhitungan <i>Bandwidth</i> sistem Saluran Serat Optik .....	69
<b>Tabel 4.9</b> Hasil Perhitungan Kapasitas Kanal sistem Antena Jamak pada <i>Radio over Fiber</i> .....	70
<b>Tabel 4.10</b> Hasil Perhitungan Eb/No sistem Antena Jamak.....	74
<b>Tabel 4.11</b> Hasil Perhitungan <i>Bit Error Rate</i> (BER) sistem Antena Jamak pada <i>Radio over Fiber</i> .....	75
<b>Tabel 4.12</b> Parameter <i>Link Power Budget</i> .....	78
<b>Tabel 4.13</b> Parameter <i>Link Power Budget</i> Optik.....	79
<b>Tabel 4.14</b> Hasil Perhitungan <i>Link Power Budget</i> sistem Antena Jamak pada <i>Radio over Fiber</i> .....	81

## DAFTAR LAMPIRAN

	halaman
<b>Lampiran 1</b> Spesifikasi <i>Single Mode Fiber</i> .....	92
<b>Lampiran 2</b> Spesifikasi Redaman Konektor.....	93
<b>Lampiran 3</b> Spesifikasi <i>Splitter</i> Optik.....	94
<b>Lampiran 4</b> Spesifikasi Daya Input Optik.....	95
<b>Lampiran 5</b> Spesifikasi WDM <i>coupler</i> .....	96
<b>Lampiran 6</b> Spesifikasi <i>Gain</i> antena MIMO 2x2 .....	97
<b>Lampiran 7</b> Spesifikasi <i>Gain</i> antena SISO 1x1 .....	98
<b>Lampiran 8</b> Listing Program Matlab SNR sistem Antena Jamak .....	99
<b>Lampiran 9</b> Listing Program Matlab Kapasitas Kanal sistem Antena Jamak .....	101
<b>Lampiran 10</b> Listing Program Matlab BER sistem Antena Jamak .....	104
<b>Lampiran 11</b> Listing Program Matlab <i>Link Power Budget</i> Antena Jamak .....	107



## ABSTRAK

**ALFI ZUHRIYA KHOIRUNNISAA**, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, April 2013, *Analisis Pengaruh Penggunaan Antena Jamak MIMO 2x2, SIMO 1x2 dan SISO 1x1 terhadap Performansi Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) dengan Teknologi Radio over Fiber (RoF)*, Dosen Pembimbing : Ir. Endah Budi Purnomowati.,MT. dan Ali Mustofa., ST., MT.

*Long Term Evolution* (LTE) dirancang untuk menghasilkan kapasitas kanal yang besar dengan menggunakan teknik antena jamak seperti MIMO 2x2. MIMO 2x2 pada LTE dikombinasikan dengan akses jamak OFDMA. Kombinasi MIMO-OFDMA ini diterapkan pada teknologi *radio over fiber* untuk mengoptimalkan infrastruktur suatu jaringan. *Radio over Fiber* (RoF) adalah teknologi yang mengintegrasikan antara teknik transmisi nirkabel dan kabel fisik dengan media serat optik. Performansi yang dibahas pada penelitian ini adalah pengaruh penggunaan teknik antena MIMO 2x2 OFDMA pada *Radio over Fiber* (RoF) dengan menganalisis SNR, Kapasitas kanal, BER dan *Link Power Budget* dibanding dengan penggunaan antena SISO 1x1 dan SIMO 1x2. Hasil simulasi dan analisis membuktikan bahwa penggunaan antena SIMO 1x2 dengan jarak UE dan enodeB 500 m dan panjang gelombang 1550 nm menghasilkan performansi terbaik pada parameter SNR = 52,648 dB, BER =  $5 \times 10^{-7}$  dengan daya yang diterima di UE = -71,09 dBm pada perhitungan *Link Power Budget*. Penggunaan antena MIMO 2x2 dengan jarak UE dan enodeB 500 m dan panjang gelombang 1310 nm menghasilkan performansi terbaik pada parameter kapasitas kanal yaitu sebesar 9,433 Gbps. Kesimpulannya, Performansi sistem yang baik saat digunakan antena SIMO 1x2. Namun, perlu diingat bahwa dengan pemakaian 1 antena pengirim pada SIMO menyebabkan tidak terjadi peningkatan efisiensi *bandwidth* sehingga tidak cocok diaplikasikan pada LTE yang mengakomodasi layanan-layanan dengan kebutuhan *bandwidth* yang tinggi dan kapasitas yang besar. Oleh karena itu, digunakanlah antena MIMO 2x2 pada OFDMA dengan teknologi *radio over fiber* yang memiliki efisien *bandwidth* yang tinggi dan kapasitas kanal yang besar karena memiliki jumlah antena pengirim lebih banyak sehingga sangat optimal bila digunakan pada jaringan LTE.

**Kata Kunci**— OFDMA, RoF, MIMO 2x2, SIMO 1x2, SISO 1x1

## ABSTRACT

**ALFI ZUHRIYA KHOIRUNNISAA**, Electrical Engineering Department, Engineering Faculty, Brawijaya University, April 2013, *The Influence Analysis of Using Antenna MIMO 2x2, SIMO 1x2 and SISO 1x1 Against the Performance of Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) on Radio over Fiber (RoF) Technology*, Advisor : Ir. Endah Budi Purnomowati.,MT. dan Ali Mustofa., ST., MT.

Long Term Evolution (LTE) is designed to generate a large channel capacity by using multiple antenna techniques such as MIMO 2x2. MIMO 2x2 is combined with OFDMA in LTE. Combination of MIMO-OFDMA is applied to the radio over fiber technology to optimize the network infrastructure. Radio over Fiber (ROF) is an integrated technology between wireless and wireline transmission system to transmit radio signal over optical fiber in wireless network. Performance are discussed in this research is the effect of using MIMO 2x2, SIMO 1x2 dan SISO 1x1 OFDMA in Radio over Fiber (ROF) by analyzing parameters SNR, channel capacity, BER and Link Power Budget. Simulation result and analysis state that the use of SIMO 1x2 at distance between UE and enodeB 500 m with 1550 nm wavelengths produced the best performance on SNR = 52,648 dB, BER =  $6 \times 10^{-7}$  and received power at UE = -71.09 dBm. Use MIMO 2x2 at distance between UE and enodeB 500 m with 1310 nm wavelengths produced the best performance on channel capacity is 9.433 Gbps. In conclusion, Performance good system when used SIMO 1x2 antenna. However, by using one antenna transmitter in SIMO 1x2 cause no increase in bandwidth efficiency, so as not properly used in LTE that accommodate services with high bandwidth and large capacity. Therefore, MIMO 2x2 is used on OFDMA with radio over fiber technology that has efficient high bandwidth and large channel capacity because it has more number of antenna transmitter so it is optimal when used in LTE networks.

**Keyword**— OFDMA, RoF, MIMO 2x2, SIMO 1x2, SISO 1x1

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Pesatnya perkembangan teknologi telekomunikasi dewasa ini, diimbangi dengan permintaan masyarakat akan kebutuhan layanan telekomunikasi secara *real time* serta keadaan masyarakat yang memiliki mobilitas yang sangat tinggi. Teknologi komunikasi yang sesuai dengan kebutuhan dan permintaan masyarakat saat ini adalah teknologi komunikasi nirkabel. Standar teknologi nirkabel dituntut harus terus mengalami evolusi menjadi semakin baik, baik dalam hal penyediaan layanan *mobile broadband*, kecepatan data, dan area akses yang semakin luas. Oleh karena itu diperlukan suatu teknologi telekomunikasi baru yang dapat mengakomodasi berbagai layanan tersebut yaitu *Long Term Evolution* (LTE)

LTE merupakan evolusi dari jaringan *Universal Mobile Telecommunications System* (UMTS) yang diproyeksikan sebagai teknologi generasi keempat. Untuk pengimplementasiannya, LTE merupakan suatu teknologi yang akan menyempurnakan infrastruktur telekomunikasi seluler saat ini yang sedang dikembangkan oleh suatu badan yang dinamakan *Third Generation Partnership Project* (3GPP) sehingga operator hanya perlu melakukan *upgrade* jaringan yang telah dimiliki oleh teknologi sebelumnya. LTE dirancang untuk mampu melakukan pengiriman data berkapasitas besar dengan *data rate* yang tinggi.

Optimisasi infrastruktur jaringan harus dilakukan pada teknologi LTE untuk memenuhi layanan data yang membutuhkan kapasitas yang tinggi dengan rugi-rugi rendah. Salah satunya adalah dengan menggunakan teknologi *Radio over Fiber* (RoF) yang memberikan solusi yang menarik dalam masalah jangkauan yang luas, kapasitas sistem yang tinggi, rugi-rugi yang rendah serta tidak memerlukan biaya tinggi. (Chun-Ting Lin.2011).

Teknologi RoF merupakan integrasi antara sistem nirkabel dan kabel, dimana pada sisi pengiriman sinyal radio dari *base station* menggunakan teknologi nirkabel sedangkan pada pengirimannya melalui media serat optik menggunakan teknologi kabel. Sistem ini menggunakan *link* serat optik untuk mentransmisikan sinyal RF antar *base station* dan

lokasi *remote* dimana antena ditempatkan. Pentransmisi di dalam *link* serat optik menggunakan tipe serat *single mode* dikarenakan memiliki rugi-rugi yang rendah. (Ilkka harjula.2008)

Pada perkembangan selanjutnya, untuk meningkatkan performansi dari RoF digunakan pula teknologi antena jamak pada sisi nirkabelnya yang dikenal dengan *Multiple Input Multiple Output* (MIMO). Pada teknologi MIMO ini digunakan lebih dari satu antena *receiver* dan *transmitter* dengan tujuan untuk menjadikan sinyal pantulan sebagai penguat sinyal utama. MIMO dapat digunakan untuk mengurangi *multipath fading* dengan menggunakan *diversity gain*, yaitu sinyal yang sama akan dikodekan secara berbeda dan ditransmisikan dari tiap antena, kemudian di sisi penerima akan dikombinasikan untuk diperoleh sinyal terbaik. Selain itu, MIMO digunakan untuk menaikkan kapasitas kanal sistem pada komunikasi nirkabel.

OFDMA merupakan teknik akses jamak pada sisi *downlink* LTE dengan ide awal untuk mengatasi efek *multipath fading* dimana setiap bit data akan dimodulasikan pada sebuah *subset subcarrier* sehingga penggunaan *bandwidth* menjadi efisien. *Multipath fading* mengakibatkan adanya perbedaan waktu (*delay*) yang menyebabkan timbulnya *Intersymbol Interference* (ISI). Untuk meminimalisasi ISI, OFDMA menggunakan *guard time* yang berakibat kapasitas kanal menjadi rendah dan memperpanjang simbol OFDMA secara *cyclic* dalam *guard time* untuk mengatasi timbulnya ICI (*Intercarrier Interference*). Pada jaringan LTE modulasi yang digunakan adalah QPSK, 16-QAM, dan 64-QAM. (Mustafa,Ergen.2009).

Kombinasi antara MIMO dan OFDMA menghasilkan sebuah solusi yang menarik karena OFDMA menawarkan efisiensi spektral yang tinggi dan mengurangi adanya *multipath fading*. Oleh karena itu integrasi MIMO-OFDMA pada *Radio over Fiber* dapat meningkatkan performa jaringan karena dapat mengurangi rugi-rugi sistem pada transmisi data, serta memberikan alokasi *bandwidth* dan kapasitas kanal yang lebih besar dibandingkan dengan pemakaian antena *Single Input Single Output* (SISO).

Penelitian ini merupakan pengembangan dari tugas akhir yang ditulis oleh Amalia Eka Rakhmania tahun 2011 yang mengkaji tentang Performansi *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA) pada Teknologi *Radio over Fiber* (RoF). Namun pada penelitian ini akan dianalisis performansi *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*

(OFDMA) pada Teknologi *Radio over Fiber* (RoF) menggunakan antena jamak yaitu *Multiple Input Multiple Output* (MIMO). (Fernando,Xavier.2009)

Untuk mengetahui performansi MIMO 2x2 dilakukan analisis terhadap beberapa parameter performansi yang meliputi *Signal to Noise Ratio* (SNR), Kapasitas kanal, *Bit Error Rate* (BER) dan *Link Power Budget* pada *Radio over Fiber* dibandingkan dengan *Single Input Multiple Output* (SIMO) 1x2, dan *Single Input Single Output* (SISO) 1x1.

## 1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dalam penelitian ini mengacu pada uraian latar belakang adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana analisis pengaruh antena jamak MIMO 2x2, SIMO 1x2 dan SISO 1x1 terhadap performansi OFDMA pada *Radio over Fiber* untuk parameter *Signal to Noise Ratio* (SNR)?
2. Bagaimana analisis pengaruh antena jamak MIMO 2x2, SIMO 1x2 dan SISO 1x1 terhadap performansi OFDMA pada *Radio over Fiber* untuk parameter Kapasitas kanal?
3. Bagaimana analisis pengaruh antena jamak MIMO 2x2, SIMO 1x2 dan SISO 1x1 terhadap performansi OFDMA pada *Radio over Fiber* untuk parameter *Bit Error Rate* (BER)?
4. Bagaimana analisis pengaruh antena jamak MIMO 2x2, SIMO 1x2 dan SISO 1x1 terhadap performansi OFDMA pada *Radio over Fiber* untuk parameter *Link Power Budget*?
5. Penggunaan antena manakah diantara MIMO 2x2, SIMO 1x2 dan SISO 1x1 yang paling baik diimplementasikan dalam rangka meningkatkan performansi sistem OFDMA pada teknologi *Radio over fiber* ?

## 1.3 Ruang Lingkup

Berdasarkan perumusan masalah diatas maka pembahasan dibatasi pada :

1. Sistem multiplexing yang digunakan adalah *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA) pada LTE release 8
2. Sistem Pembanding meliputi teknologi antena jamak SIMO 1x2 dan SISO 1x1

3. MIMO 2x2 menggunakan skema SM (*Spatial Multiplexing*)
4. Jenis Modulasi yang digunakan adalah 64-QAM
5. Parameter sistem MIMO-OFDMA yang akan dibahas berupa performansi SNR, kapasitas kanal, BER dan *Link Power Budget*
6. Tipe serat optik yang digunakan adalah serat optik *single mode* dengan panjang gelombang 1550 nm dan 1310 nm berdasarkan ITU-T G.652
7. Proses pengambilan data melalui simulasi menggunakan *software* Matlab 7.04,

#### 1.4 Tujuan

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penggunaan antena *Multiple Input Multiple Output* (MIMO) 2x2 terhadap performansi *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA) pada Teknologi *Radio over Fiber* dengan sistem pembanding berupa teknologi antena jamak jenis *Single Input Multiple Output* (SIMO) 1x2 dan *Single Input Single Output* (SISO) 1x1, dilihat dari parameter SNR, kapasitas kanal, BER dan *Link Power Budget*.

#### 1.5 Sistematika Penulisan

Penelitian ini akan disusun dalam lima bab dengan sistematika penulisan sebagai berikut :

##### BAB I PENDAHULUAN

Memuat latar belakang, rumusan masalah, ruang lingkup, tujuan dan sistematika penulisan

##### BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Mengkaji teori-teori yang menunjang penelitian ini, diantaranya tentang dasar teori mengenai sistem *Radio over Fiber*, teknologi OFDMA meliputi pengertian OFDMA, blok diagram OFDMA serta kelebihan dan kekurangan OFDMA, mengkaji tentang dasar teknologi antena jamak meliputi pengertian teknologi multi antena, konsep dasar sistem SISO, SIMO dan MIMO, skema sistem MIMO, dan parameter-parameter yang digunakan untuk menghitung performansi MIMO-OFDMA pada teknologi RoF

### BAB III METODOLOGI

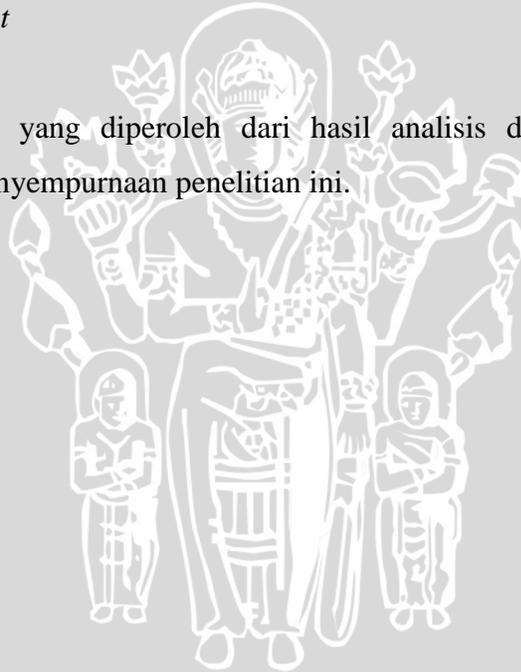
Membahas metode-metode yang digunakan untuk menjawab rumusan masalah yaitu berupa studi literatur mengetahui dasar teknologi RoF, teknologi OFDMA dan teknologi antena jamak yaitu MIMO 2x2, SIMO 1x2, dan SISO 1x1, kemudian pengambilan data yang berupa data sekunder yang diperoleh dari berbagai buku teks, jurnal, dan internet, kemudian melakukan perhitungan sistem dan melakukan analisis data melalui perhitungan, serta pengambilan kesimpulan berdasarkan hasil analisis data.

### BAB IV HASIL SIMULASI DAN PEMBAHASAN

Pembahasan merupakan hasil analisis perhitungan dan simulasi mengenai penerapan MIMO-OFDMA pada Teknologi RoF dengan parameter SNR, kapasitas kanal, BER dan *Link Power Budget*

### BAB V PENUTUP

Membuat kesimpulan yang diperoleh dari hasil analisis data serta saran untuk pengembangan dan penyempurnaan penelitian ini.



## BAB II TINJAUAN TEORI

### 2.1 Long Term Evolution (LTE)

LTE adalah proyek berbasis OFDMA yang dikembangkan oleh 3GPP dalam rangka mengakomodasi peningkatan penggunaan *mobile data* dan aplikasi baru multimedia. Radio akses OFDMA pada LTE disebut sebagai E-UTRAN (*Evolved-UMTS Terrestrial Radio Access Network*). Keseluruhan arsitektur LTE disebut sebagai 3GPP EPS (*Evolved Packet System*), yang sebelumnya disebut arsitektur SAE (*System Architecture Evolution*).

LTE didesain untuk mendapatkan performansi dengan nilai *throughput* yang tinggi, meningkatkan kapasitas *base station*, mengurangi *latency* dan *full mobility*. Peningkatan performansi tersebut dibantu dengan adanya penggunaan antena jamak *Multiple Input Multiple Output* (MIMO) yang digunakan pada radio akses OFDMA di LTE.

LTE yang digunakan pada penelitian ini adalah LTE *release* 8 yang dikeluarkan oleh 3GPP pada bulan Desember 2008, dimana memiliki kecepatan *downlink/uplink* sebesar 100/50 Mbps untuk frekuensi 20 MHz serta kapasitas sebesar >200 pengguna tiap *cell* (Ergen, Mustafa. 2009)

#### 2.1.1 Spesifikasi LTE

Teknologi LTE memiliki nilai spesifikasi teknis yang lebih tinggi dibandingkan dengan teknologi sebelumnya. Tabel 2.1 menunjukkan spesifikasi teknis untuk teknologi LTE.

**Tabel 2.1** Spesifikasi Teknis LTE

<b>Parameter Spesifikasi Teknis</b>	<b>Jenis/Nilai</b>
<i>Peak data rates</i>	100 Mbit/s for <i>downlink</i> ; 50 Mbit/s for <i>uplink</i>
<i>Average user throughput per MHz than HSPA Release 6</i>	3-4 higher for <i>downlink</i> ; 2-3 higher for <i>uplink</i>
<i>Mobility</i>	0-15 km/h (optimum); 15-120 km/h ( <i>high performance guaranteed</i> ); 120-350 km/h ( <i>connection maintained</i> )
<i>Bandwidth</i>	1.4-20 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> )

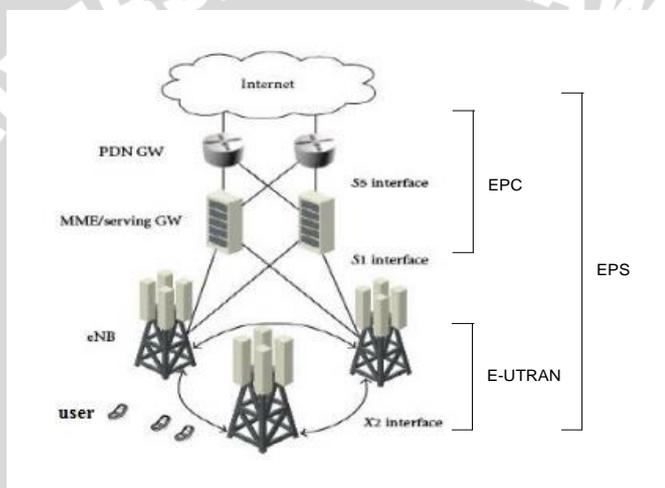


	SC-FDMA ( <i>uplink</i> )
MIMO	Downlink 2x2, 4x2, 4x4 Uplink 1x2, 1x4
Modulation	QPSK, 16-QAM, 64-QAM
Latency	5ms user-plane latency at IP layer, for one-way 100 ms control-plane latency from idle to active state
User per cell	At least 200 at 5MHz bandwidth At least 400 at bandwidth > 5MHz

(Sumber : K. Fazel dan S. Kaiser, 2008)

## 2.2 Arsitektur Long Term Evolution (LTE)

Keseluruhan arsitektur jaringan LTE disebut juga dengan 3GPP EPS. Arsitektur jaringan LTE ditunjukkan pada Gambar 2.1.



**Gambar 2.1** Arsitektur Jaringan LTE

(Sumber : Ergen, Mustafa. 2009)

- UE (*User Equipment*)

UE adalah perangkat yang digunakan pelanggan untuk melakukan komunikasi. UE terdiri dari TE (*Terminal Equipment*) yang berfungsi sebagai terminal radio yang digunakan untuk komunikasi lewat radio dan USIM (*Universal Subscriber Identity Module*) yang berfungsi sebagai bukti dan identitas pengguna serta untuk memperoleh *security key* untuk melindungi *interface* transmisi radio. (H. Holma dan A. Toskala, 2009)

Di dalam UE juga terdapat *user-plane* protokol yang terdiri dari layer PDCP, RLC, MAC dan PHY yang berkomunikasi dengan eNB melewati jalur nirkabel LTE. (Ergen, Mustafa. 2009)

- E-UTRAN (*Evolved - UMTS Terrestrial Radio Access Network*)

Jaringan akses LTE yang disebut E-UTRAN merupakan jaringan akses radio yang menyediakan koneksi antara UE dan EPC (*Evolved Packet Core*). UE berhubungan dengan eNB dan eNB berhubungan dengan EPC dan yang lainnya seperti terlihat pada Gambar 2.1.

E-UTRAN terdiri dari eNB (*Evolved Node B*) yang mana *base station* pada LTE dan bertanggungjawab untuk menghasilkan *user plane* protokol yang berfungsi sebagai layanan *bearer* untuk membawa data pelanggan dan *control plane* protokol yang berfungsi mengontrol layanan *bearer* dan hubungan antar UE serta jaringan pada E-UTRAN. Sejumlah eNB dihubungkan satu dengan lainnya dengan topologi *full mesh*.(Mustafa,Ergen,2009)

- EPC (*Evolved Packet Core*)

EPC bertanggung jawab untuk pengontrolan secara menyeluruh dari eNodeB dan pembentukan *bearer*. EPC terdiri dari :

- a. PCRF (*Policy Control and Charging Rules Function*)

PCRF bertanggung jawab untuk mengontrol kebijakan pembuatan keputusan dan kemampuan aliran data berdasarkan PCEF (*Policy Control Enforcement Function*) yang terletak pada PDN-GW (*Packet Data Network Gateway*). PCRF menyediakan otorisasi QoS (*Quality Of Service*) yang menentukan bagaimana aliran data tertentu akan diperlakukan dalam PCEF dan memastikan bahwa hal ini sesuai dengan profil pengguna berlangganan.

- b. HSS (*Home Subscription Server*)

HSS berfungsi untuk menyimpan data dan informasi mengenai pelanggan agar tersimpan secara permanen. HSS juga berisi rekaman lengkap lokasi terkini dari *user*.

- c. PDN-GW (*Packet Data Network Gateway*)

PDN-GW merupakan jangkar untuk mobilitas antara 3GPP dengan teknologi *non-3GPP* seperti WiMAX, 3GPP2 dan WLAN (*Wireless Local Area Network*) melalui beberapa *interface*. PDN-GW menyediakan konektivitas dengan jaringan paket data eksternal. Selain itu PDN-WG bertanggung jawab untuk mengalokasikan alamat IP UE, pengisian aliran data berdasarkan aturan dari PCRF dan menyaring *downlink* paket IP *user* kedalam *bearer* QoS yang berbeda.

d. S-GW (*Serving Gateway*)

Semua pengguna paket IP dikirimkan melalui S-GW, yang berfungsi sebagai jangkar untuk mobilitas data *bearer* bila UE bergerak di antara eNodeB. S-GW juga bertanggung jawab dalam menetapkan *routing* dan meneruskan paket data *user* dengan *interface* S-1, menangani kompresi *header* IP serta enkripsi data *user*.

e. MME (*Mobility Management Entity*)

MME adalah *node* kontrol yang memproses sinyal antara UE dan CN (*Core Network*)/EPC. Selain itu MME juga berfungsi sebagai autentifikasi dan keamanan serta *mobility management*. Protokol yang berjalan antara UE dan CN dikenal sebagai protokol *Non-Access Stratum* (NAS).

- *Interface* jaringan

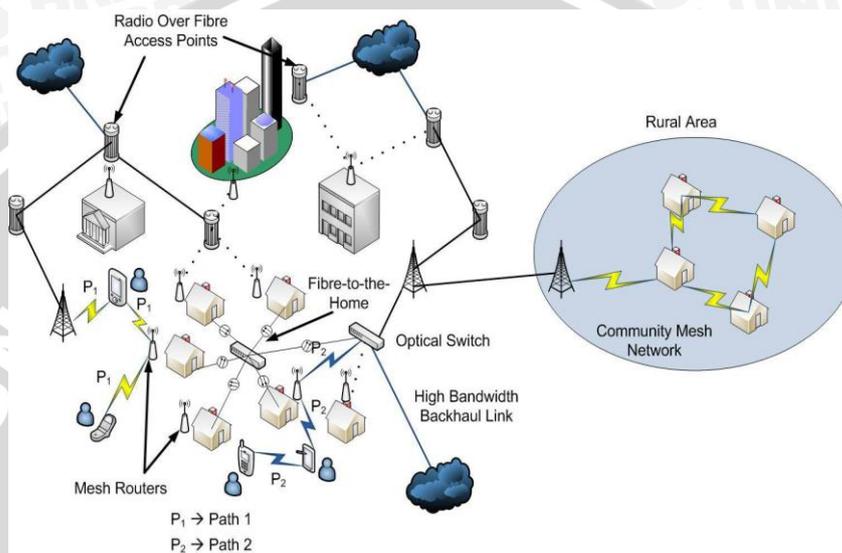
- a. *Interface* LTE-Uu, yaitu *interface* yang menghubungkan eNodeB dan UE.
- b. *Interface* X2, yaitu *interface* yang menghubungkan antar eNodeB.
- c. *Interface* S1, yaitu *interface* yang menghubungkan EPC dan eNodeB.
- d. *Interface* S1-MME, yaitu *interface* yang menghubungkan MME dan eNodeB.
- e. *Interface* S1-U, yaitu *interface* yang menghubungkan S-GW dan eNodeB.
- f. *Interface* SGi, yaitu *interface* yang menghubungkan PDN-GW dan jaringan paket data.
- g. *Interface* S5/S8, yaitu *interface* yang menghubungkan S-GW dan PDN-GW.
- h. *Interface* S11, *interface* yang menghubungkan MME dan S-GW. (Mustafa Ergen, 2009)

### 2.3 Radio over Fiber (RoF)

Perkembangan *bandwidth* yang sangat tinggi pada layanan radio membawa sebuah tantangan tersendiri bagi operator untuk fokus dalam memperbaiki jaringan dengan cara mengoptimalkan infrastruktur jaringan. Selain itu, perkembangan teknologi nirkabel dewasa ini telah mengarah pada *broadband wireless* dimana teknologi ini menuntut suatu jaringan dapat *coverage* semua area tanpa adanya *blank spot*, sehingga memerlukan banyak pembangunan *base station* dengan biaya perangkat yang sangat tinggi. Untuk menekan biaya yang tinggi tersebut maka diperlukan teknologi *Radio over Fiber* sebagai solusi menarik untuk mengoptimalkan performansi jaringan. (Ilkka Harjula.2008)

Teknologi *Radio over Fiber* merupakan teknologi baru dalam transmisi yang mengintegrasikan antara teknologi kabel dan nirkabel yang dapat dilihat pada Gambar

2.2, dimana pada teknologi *radio over fiber* pada pengiriman data dari *Central Base Station* (BSC) ke *Base Station* dikirim melalui media fisik berupa serat optik dan pada sisi *Base Station*/RAU menuju *end users* menggunakan sistem transmisi nirkabel berupa sinyal gelombang radio. Hal ini dilakukan untuk menjangkau lokasi di luar daerah cakupan *cell base station*, sehingga tidak perlu dilakukan pembangunan *base station* baru.



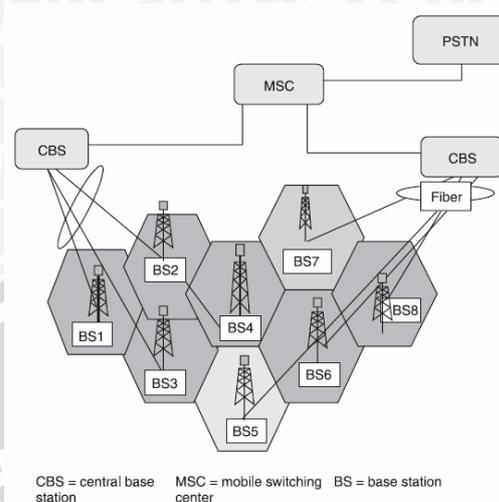
**Gambar 2.2.** Integrasi Jaringan Kabel-Nirkabel

(Sumber : Hamed Al-Raweshidy, 2010)

Konsep dasar dari teknologi RoF pada Gambar 2.3 adalah penggunaan link serat optik untuk mendistribusikan sinyal RF dari lokasi *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 untuk mendistribusikan sinyal RF ke RAU, serat optik yang banyak digunakan adalah serat optik menurut ITU-T G.652 yang mempunyai rugi-rugi yang rendah yaitu panjang gelombang 1550 nm dan 1310 nm . 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,

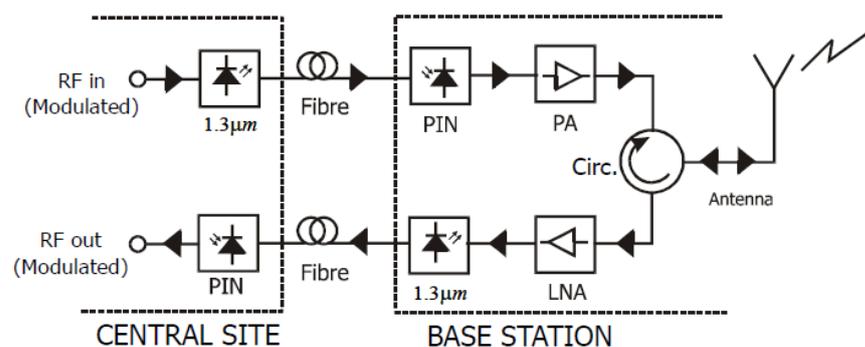
terutama pada sistem komunikasi *broadband wireless* dengan cakupan luas dan dengan jumlah BS banyak.



**Gambar 2.3.** Konsep Sistem Radio over Fiber

(Sumber : Hamed Al Raweshdy, 2002)

Gambar 2.4 menunjukkan jalur transmisi RoF sederhana. Konfigurasi dasar RoF terdiri dari *interface bidirectional*, yaitu *transmitter* laser serta penerima fotodiode yang terletak pada *base station* atau *remote antenna unit*, yang dipasangkan dengan *transmitter* laser serta penerima fotodiode yang terletak pada *radio processing unit*. Sinyal RF digunakan untuk memodulasi langsung diode laser di *central site*. Intensitas yang dihasilkan sinyal optik termodulasi ini kemudian ditransmisikan kedalam serat optik ke BS (RAU). Pada RAU, sinyal RF ditransmisikan kemudian dikonversikan langsung dengan pendeteksian PIN *photodetector*. Sinyal tersebut kemudian diperkuat dan dipancarkan oleh antenna. Metode transportasi sinyal RF tersebut disebut *Intensity Modulation with Direct Detection (IM-DD)*, yang merupakan bentuk paling sederhana dari link RoF, dan lebih mudah untuk diimplementasikan, selain itu metode IM-DD lebih murah dalam hal pemakaian perangkat. (Chang, S.William.2002)



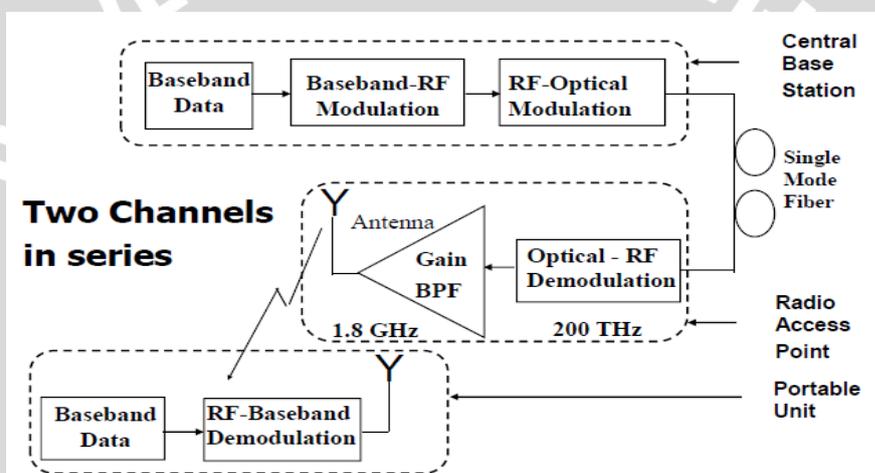
**Gambar 2.4.** *Intensity Modulation with Direct Detection (IM-DD)* pada Link RoF

(Sumber: Ng'oma,Anthony. 2003)

Namun pada metode transportasi dengan IM-DD ini, terdapat kelemahan diantaranya sulit diimplementasikan pada frekuensi yang tinggi dan mudah terkena dispersi material.

#### 2.4 Arsitektur *Radio over Fiber (RoF)*

*Radio over fiber* merupakan teknologi integrasi antara komunikasi kabel dan nirkabel dimana terdiri dari 4 komponen penyusun pertama diantaranya : *central base station*, serat optik, *base station/radio access point* dan *portable unit/end users*. (Rakhmania,Amalia Eka.2012)



**Gambar 2.5.** Arsitektur *Radio over Fiber*

(Sumber: Xavier Fernando, 2009)

##### a. *Central Base Station (BSC)*

*Central Base station (BSC)* yang digunakan dapat berupa *transceiver* yang bergantung pada aplikasi *radio over fiber*. Pada sisi ini digunakan sistem transmisi kabel berupa media serat optik yang digunakan untuk mengirimkan data dari BSC ke BS/RAU. Sisi *base station* ini terdiri dari pemrosesan data *baseband* melalui modulator RF, sumber optik serta modulator optik.

##### - **Sumber Optik**

Teknologi RoF merupakan sebuah jaringan yang memiliki jarak jangkauan cukup jauh sehingga digunakan sumber optik laser, karena laser memiliki intensitas yang lebih tinggi dan spektrum cahaya (*line width spectral*) yang lebih kecil 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 oleh emisi spontan yang menjadi sifat dari mekanisme pembangkitan laser pada umumnya. RIN dapat mengakibatkan fluktuasi nyata dari intensitas cahaya yang dihasilkan oleh laser dan fluktuasi frekuensi cahaya yang dapat menurunkan sinyal jika serat optik terdispersi, nilai RIN dinyatakan dengan:

$$\langle I_{RIN}^2 \rangle = RIN \cdot I_D^2 \cdot B \quad (2.1)$$

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)

#### - **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.

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, 2004).

#### b. **Serat Optik**

Sinyal yang telah dimodulasi dipropagasikan menuju penerima melalui serat optik berbahan *silica* yang memiliki beberapa keunggulan diantaranya memiliki rugi-rugi yang rendah, dapat membawa data dengan kapasitas yang besar serta tidak memerlukan sekuritas yang tinggi. Namun penggunaan serat ternyata masih dipengaruhi oleh *noise* distorsi dan rugi-rugi lainnya yang dapat mempengaruhi performansi sistem jaringan. Beberapa jenis rugi-rugi yang mempengaruhi performansi serat optik adalah (Rakhmania, Amalia Eka. 2012):

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):

$$L_{op} = 2(n_c l_c + n_s l_s + n_{sp} l_{sp} + \alpha(\lambda) l_f) \quad (2.2)$$

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)

$n_{sp}$  = jumlah *splitter*

$l_{sp}$  = koefisien redaman *splitter* (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:

$$\langle I_{shot}^2 \rangle = 2 \cdot q \cdot \langle I_D \rangle \cdot B \quad (2.3)$$

dengan:

$$\langle I_{shot}^2 \rangle = \text{shot noise}$$

$$q = \text{muatan elektron } (1.6 \times 10^{-19} \text{ C})$$

$$I_D (t) = \text{arus DC rata-rata yang terdeteksi (A)}$$

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

## 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:

$$\langle I_{th}^2 \rangle = \frac{4 \cdot K \cdot T \cdot B}{R} \quad (2.4)$$

dengan:

$$\langle I_{th}^2 \rangle = \text{thermal noise}$$

$$K = \text{konstanta Boltzmann } (1.38 \times 10^{-20} \text{ mW/kHz})$$

$$T = \text{suhu absolute (300 K)}$$

$$B = \text{bandwidth sistem (kHz)}$$

$$R = \text{hambatan beban (ohm)}$$

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

$$E[n_{op}^2(t)] = (\langle I_{shot}^2 \rangle + \langle I_{RIN}^2 \rangle + \langle I_{th}^2 \rangle) \quad (2.5)$$

Selain *noise* dan redaman tersebut, dalam transmisi serat optik terjadi dispersi sinyal optik, yaitu pelebaran sinyal optik pada daerah waktu yang akan menyebabkan

pulsa-pulsa cahaya memuai dan menjadi lebih lebar, sehingga mengakibatkan pulsa-pulsa tersebut saling tumpang tindih satu dengan yang lainnya. Dengan demikian dispersi merupakan salah satu pembatas kecepatan transmisi dalam sistem transmisi serat optik.

Pada *radio over fiber* yang menggunakan serat optik *single mode*, salah satu 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. Hal ini menimbulkan dispersi pulsa karena sumber cahaya tidak terdiri dari frekuensi tunggal sehingga akan menjalar dengan kecepatan yang berbeda.

$$\tau_m = \Delta\lambda.l.D_m \quad (2.6)$$

dengan:

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

### c. **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 sekomples BTS. RAP ini terdiri dari beberapa komponen, yaitu *photodetector*, *Gain BPF*, dan antena.

#### - **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.

#### - **Gain BPF**

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

- **Antena**

Digunakan untuk memancarkan sinyal RF ke *subscriber*.

d. **Portable Unit/User Equipment**

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

## 2.5 Kelebihan dan Kekurangan Teknologi *Radio over Fiber*

### 2.5.1 Kelebihan Teknologi *Radio over Fiber*

a. **Rugi-Rugi Rendah**

Pengiriman data dari BSC ke BS menggunakan sinyal gelombang mikro dengan frekuensi tinggi dalam ruang bebas memiliki rugi-rugi berupa penyerapan, hamburan dan pemantulan. Untuk pentransmisi jarak yang jauh membutuhkan banyak peralatan regenerasi agar sinyal yang diterima di BS sesuai dengan sinyal yang dikirimkan. Peralatan regenerasi tersebut merupakan peralatan yang memiliki persyaratan khusus sebagai penguat dan repeater. Pendistribusian menggunakan sinyal gelombang mikro ini terbilang sangat rumit dan membutuhkan perangkat banyak sehingga meningkatkan biaya. Selain itu juga banyak dipengaruhi oleh gangguan propagasi gelombang sehingga menurunkan performansi sistem. Solusi alternatifnya adalah menggunakan serat optik, yang menawarkan rugi-rugi yang lebih rendah.

Serat optik *single mode* dipilih untuk diaplikasikan dalam teknologi *radio over fiber* pada penelitian ini yaitu pada panjang gelombang 1550 nm dan 1310 nm berdasarkan standar ITU-T G.652. Rugi-rugi ini lebih rendah daripada propagasi ruang bebas dan transmisi kabel tembaga untuk gelombang mikro frekuensi tinggi, sehingga jarak transmisi dapat dinaikkan dan mengurangi daya transmisi yang dibutuhkan.

b. **Bandwidth yang Lebar**

Serat optik memiliki *bandwidth* yang lebih lebar dibandingkan media nirkabel. Saat ini *bandwidth* yang dapat disediakan oleh serat optik mencapai 1,6 THz.

c. **Tahan Terhadap Interferensi Radio Frekuensi**

Komunikasi serat optik memiliki imunitas terhadap interferensi elektromagnetik karena sinyal ditransmisikan dalam bentuk cahaya melalui serat optik, bukan dalam bentuk gelombang elektromagnetik.

**d. Pemusatan Fungsi (Sentralisasi)**

RoF menghilangkan kebutuhan akan osilator lokal dan peralatan lain pada *remote antenna unit* (RAU) karena peralatan modulasi dan *switching* disimpan di BSC dan digunakan bersama oleh beberapa RAU. Hal ini menyebabkan RAU yang lebih sederhana sehingga dapat mengurangi biaya instalasi dan perawatan, mengingat membutuhkan pembangunan RAU/BS yang sangat banyak.

**e. Dapat mengurangi Konsumsi Daya**

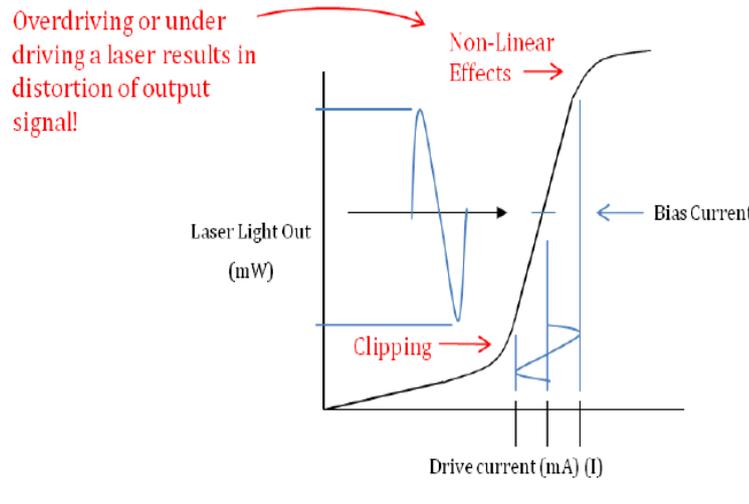
Kelebihan dari teknologi *Radio over Fiber* ini adalah adanya sharing infrastruktur jaringan sehingga dapat mengurangi sejumlah perangkat *base station/remote antenna unit* karena adanya pemusatan fungsi yang terjadi pada *central base station*. Pada beberapa aplikasi, antena dioperasikan dalam mode pasif. Pengurangan konsumsi daya pada RAU merupakan sesuatu yang sangat penting bahwa RAU dapat dipindahkan di lokasi terpencil yang tidak memiliki konsumsi daya yang tinggi.

**f. Operasional yang bersifat Fleksibel**

RoF menawarkan keuntungan berupa operasionalnya yang sangat fleksibel, hal ini dapat dicapai dengan menggunakan *single mode fiber* yang memiliki dispersi yang rendah yang dikombinasikan dengan pra modulasi *subcarrier* sinyal RF. Jaringan RoF yang sama dapat digunakan untuk mendistribusikan multi-operator dan multi-layanan trafik yang menghasilkan penghematan biaya sangat besar

### **2.5.2 Kekurangan Radio over Fiber**

Laser merupakan sumber dari media serat optik yang memiliki sifat *non-linier*, dikatakan *non-linier* jika intensitas cahaya yang dihasilkan tidak sesuai dengan arus *threshold* yang masuk. Laser bekerja dengan baik pada daerah linier untuk mendapatkan transfer sinyal RF kedalam domain optik dengan tepat.



**Gambar 2.6.** Karakteristik Transfer Laser Diode  
(Sumber : Optics Inc.2010)

Jika titik bias tidak diatur secara tepat, keluaran optik yang dimodulasi oleh sinyal optik dapat mengalami pemotongan (*clipping*) pada bagian bawah atau dan terkompresi pada bagian atas sehingga terjadi pengurangan daya sinyal. Hal ini menyebabkan sinyal RF yang terdistorsi pada penerima dan dapat menyebabkan penurunan kinerja dari link *Radio over Fiber* (RoF). (Febrizal, 2009)

## 2.6 Aplikasi Teknologi *Radio over Fiber*

Beberapa aplikasi yang menggunakan teknologi *Radio over Fiber*, diantaranya :  
(Harliza,Siti.2007)

### a. *Mobile Communication Network*

Jaringan radio didistribusikan oleh sistem antenna yang berpotensi sebagai adaptif antenna yang berfungsi untuk meningkatkan efisiensi spektrum. Sistem distribusi antenna menghasilkan infrastruktur yang membawa *interface radio* sangat dengan dengan pengguna, penggunaan teknologi RoF pada aplikasi ini sangat menguntungkan diantaranya dapat mengurangi daya sinyal RF pada RAU dan dapat mengurangi adanya *multipath fading*.

### b. *Multipoint Video Distribution Services (MVDS)*

MVDS adalah pendistribusian video menggunakan sistem transmisi secara terestial untuk video broadcasting (TV). MVDS biasa digunakan untuk melayani area kota kecil. Alokasi frekuensi untuk layanan ini yaitu pada band 40 GHz. Pada MVDS, pemancar yang berfungsi untuk mengcover area ditempatkan pada gedung yang

tinggi. Perangkat rooftop dapat disederhanakan dengan menggunakan teknologi RoF, sehingga dapat mengurangi pembebanan pada pemancar akibat digunakannya link serat optik, selain itu juga dapat menambah jarak beberapa ratus meter.

**c. Jaringan Selular**

Seiring dengan peningkatan jumlah pelanggan *mobile* komunikasi diimbangi dengan meningkatnya permintaan layanan *broadband* sehingga meningkatkan kapasitas sistem, diperlukan teknologi RoF yang dapat menghemat biaya secara efektif tentang masalah perangkat serta adanya penggunaan link serat optik yang dapat meningkatkan kapasitas serta mengurangi rugi-rugi sistem

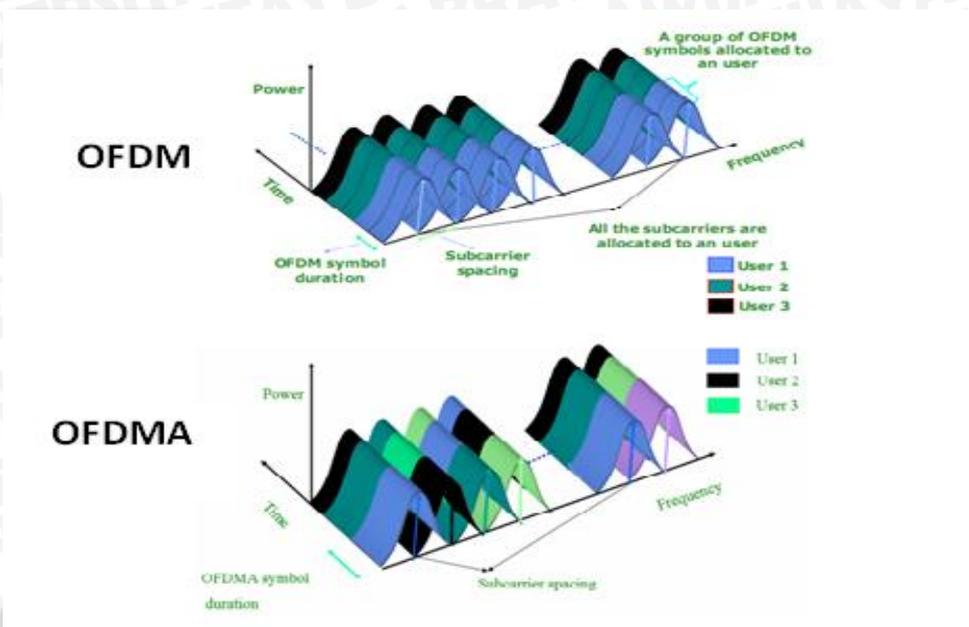
**d. Komunikasi Satelit**

Penggunaan teknologi RoF pada komunikasi satelit yaitu dalam hal meletakkan antenna pada tempat yang cocok dengan menggunakan serat optik sepanjang kurang dari 1 km dan beroperasi pada frekuensi 1-15 GHz sehingga perangkat dengan frekuensi yang tinggi dapat dipusatkan.

### **2.7 Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA)**

*Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA)* merupakan teknik *multiple access* yang menempatkan sejumlah subcarrier yang berbeda dengan frekuensi yang sama untuk pengguna yang berbeda. Dalam hal ini, lebih dari satu pengguna dapat mengakses *air interface* pada waktu yang sama, dengan kata lain dalam OFDMA sejumlah *subcarrier* dapat digunakan untuk membawa data untuk satu pengguna saja.

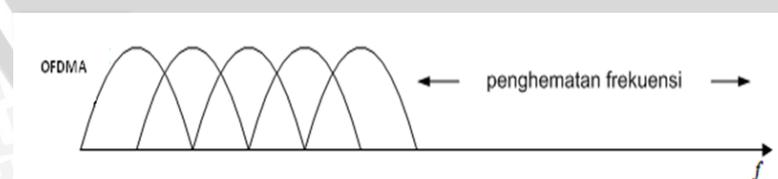
OFDMA berbeda dengan OFDM, dimana OFDM merupakan sebuah modulasi yang membagi frekuensi menjadi beberapa subcarrier untuk satu pengguna pada waktu yang sama dan hanya satu pengguna yang dapat mentransmisikan data pada suatu waktu tertentu. Dalam OFDM setiap pengguna hanya direpresentasikan dengan satu simbol dalam waktu tertentu, Berbeda dengan OFDMA, pada periode waktu tertentu, kanal dapat melayani *multiple user* karena *user* dialokasikan ke dalam banyak *subcarrier* secara terdistribusi atau acak. (Yang, Samuel C.2010). Seperti terlihat pada gambar 2.7



**Gambar 2.7.** Perbedaan sinyal OFDM dan OFDMA dalam *domain* frekuensi dan waktu  
(Sumber : Srikanth S., 2007)

OFDMA juga memiliki prinsip kerja yang sama dengan OFDM yaitu mengirimkan banyak pesan pada satu kanal transmisi. OFDMA juga dapat mengirimkan pesan tanpa terjadi *inter-carrier interference* (ICI) dan *inter-symbol interference* (ISI). Hal ini dikarenakan adanya proses penambahan *cyclic prefix* (CP) pada simbol OFDMA.

OFDMA juga menggunakan sinyal *orthogonal*, dimana awal spektrum frekuensi berada tepat di spektrum sebelumnya sehingga *overlapping* dari frekuensi *carrier* tidak mempengaruhi sinyal. Dengan demikian akan menghilangkan adanya *band guard*, sehingga penggunaan *bandwidth* lebih efisien. Gambar 2.8 menunjukkan bahwa teknologi OFDMA mampu menekan penggunaan *bandwidth*.



**Gambar 2.8.** Efisiensi Penggunaan *Bandwidth* pada OFDMA  
(Sumber : Ramjee Prasaad, 2004)

Setiap *subcarrier* dalam suatu sinyal OFDMA dijaga sedekat mungkin secara teoritis agar diperoleh orthogonalitas pada setiap *subcarrier*. OFDMA mencapai

orthogonalitas di dalam *domain* frekuensi dengan mengalokasikan setiap sinyal informasi yang terpisah ke dalam *subcarrier* yang berbeda. Jarak antar *subcarrier* ( $\Delta f$ ) pada spektrum sinyal dapat dinyatakan dengan persamaan (Hara & Prasad, 2003):

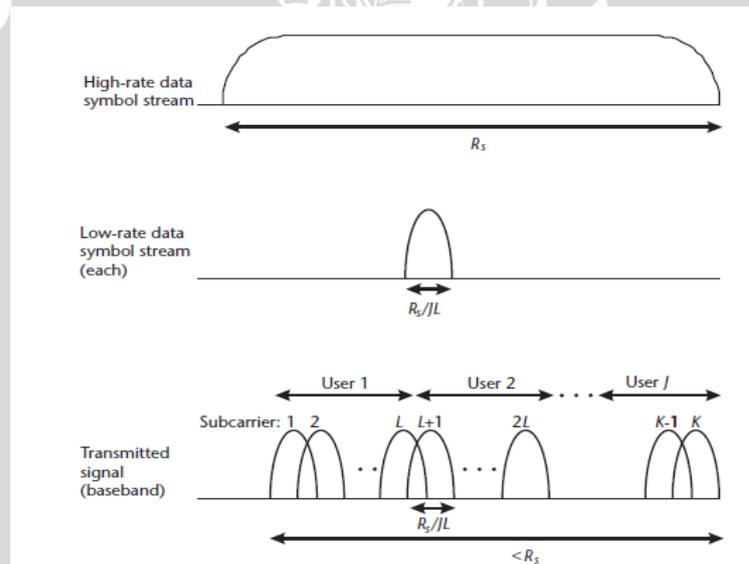
$$\Delta f = \frac{1}{T_{sub} - T_{cp}} \quad (2.7)$$

dengan :

- $\Delta f$  = selang antar frekuensi tiap *subcarrier* (Hz)
- $T_{sub}$  = durasi simbol masing-masing *subcarrier* (s)
- $T_{cp}$  = durasi *cyclic prefix* (s)

### 2.7.1 Pembagian Aliran Data pada OFDMA

Prinsip dasar sistem OFDMA adalah membagi sebuah  $M$  laju data yang tinggi menjadi  $N$  laju data rendah, seperti yang terlihat pada Gambar 2.9.



**Gambar 2.9.** Pembagian Aliran Data OFDMA

(Sumber : Yang, Samuel C.2010)

Pada sistem OFDMA, laju transmisi total yang tersedia dibagi kedalam beberapa *subcarrier* agar dapat mentransmiskikan data dengan laju data rendah. Laju transmisi untuk masing-masing *subcarrier* dari laju transmisi total yang tersedia dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$R_{sub} = \frac{R_{tot}}{N} \quad (2.8)$$

dengan :

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

$R_{tot}$  = laju transmisi total (bps)

$N$  = jumlah *subcarrier*

Dan durasi simbol untuk suatu modulasi pada masing-masing *subcarrier* dinyatakan dengan persamaan berikut (Tufvesson, 1998) :

$$T_{sub} = \frac{\log_2 \cdot M}{R_{sub}} = \frac{N \cdot \log_2 \cdot M}{R_{tot}} \quad (2.9)$$

dengan :

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

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

$R_{tot}$  = laju transmisi total (bps)

$N$  = jumlah *subcarrier*

$M$  = jumlah kemungkinan sinyal

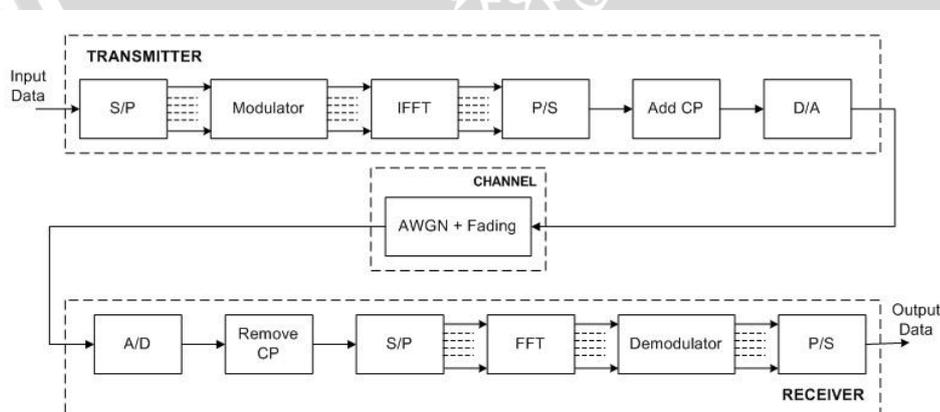
untuk modulasi QPSK nilai  $M = 2^2 = 4$

untuk modulasi 16-QAM nilai  $M = 2^4 = 16$

untuk modulasi 64-QAM nilai  $M = 2^6 = 64$

### 2.7.2 Blok Diagram OFDMA

Gambar 2.10 merupakan blok diagram dasar dari suatu pemancar dan penerima OFDMA.



**Gambar 2.10.** Blok Diagram Sistem OFDMA.

(Sumber : Farouq Khan, 2009)

**a. Konversi Serial ke Paralel (S/P)**

Data yang akan dipancarkan umumnya dalam bentuk aliran data serial. Pada OFDMA, proses konversi serial ke paralel dibutuhkan untuk mengubah masukan aliran bit data serial ke dalam data-data yang akan dipancarkan dalam setiap simbol OFDMA. 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 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.

**b. Modulator dan Demodulator Baseband**

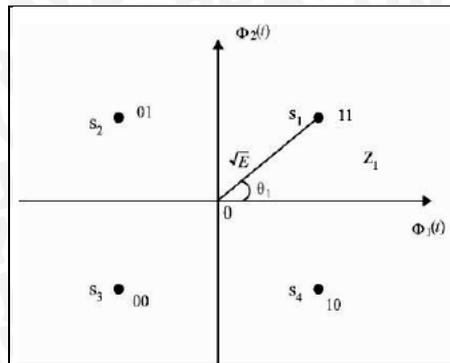
Modulator bertugas mengkodekan informasi dari sebuah pesan menjadi simbol yang cocok untuk pengiriman. Karena pada sistem ini sumber informasinya berupa data digital, maka digunakan modulator *baseband* digital yang memodulasikan  $M$ -bit menjadi satu simbol yang disebut juga dengan modulasi  $M$ -ary. Pada OFDMA teknik modulasi yang digunakan adalah *Quadrature Phase Shift Keying* (QPSK) dan *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM).

- ***Quadrature Phase Shift Keying* (QPSK)**

QPSK adalah teknik modulasi yang paling sering digunakan diantara teknik modulasi  $M$ -ary PSK lainnya karena tidak mengalami penurunan *bit error rate* (BER). Sinyal QPSK dapat dituliskan pada persamaan :

$$s_i(t) = A \cos(2\pi f_c t + \theta_i), 0 \leq t \leq T, i = 1,2,3,4 \quad (2.10)$$

Fasa sinyal awal adalah  $\pi/4, 3\pi/4, 5\pi/4, 7\pi/4$ . Frekuensi pembawa dipilih sebagai kelipatan dari *symbol rate* (laju simbol). Oleh karena itu, pada setiap interval simbol ( $kT, (k+1)T$ ), fasa sinyal awal juga merupakan salah satu dari empat fasa sinyal QPSK.



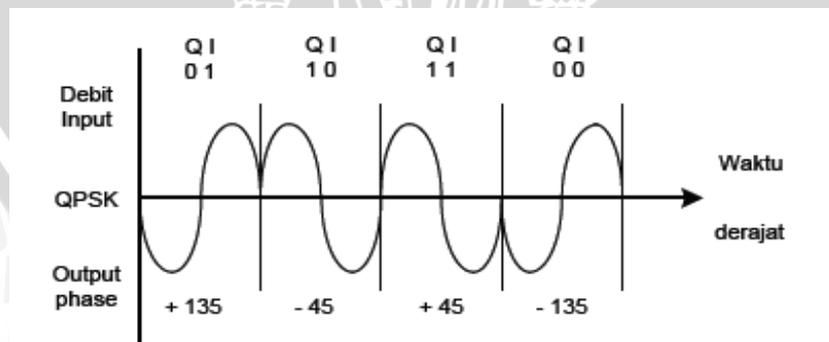
**Gambar 2.11.** Konstelasi Sinyal QPSK  
(Sumber : Yanuarni, Nurlita. 2012)

Pada QPSK, *bit* data dibagi menjadi kelompok dari dua *bit*, disebut *dibit*. Ada empat kemungkinan *dibit*, yaitu 00, 01, 10, dan 11. Masing-masing dari empat sinyal QPSK melambangkan salah satu *dibit*. Pada QPSK, logika 1 diwakili +1 Volt sedangkan logika 0 diwakili -1 Volt. Keluaran modulator QPSK seperti yang terlihat pada tabel di bawah ini :

Input ( <i>dibit</i> )	Keluaran modulator QPSK
00	$-1 \cos \omega_c t - 1 \sin \omega_c t = \sqrt{2} \sin(\omega_c t - 135^\circ)$
01	$-1 \cos \omega_c t + 1 \sin \omega_c t = \sqrt{2} \sin(\omega_c t - 45^\circ)$
10	$+1 \cos \omega_c t - 1 \sin \omega_c t = \sqrt{2} \sin(\omega_c t + 135^\circ)$
11	$+1 \cos \omega_c t + 1 \sin \omega_c t = \sqrt{2} \sin(\omega_c t + 45^\circ)$

(Sumber : Yanuarni, Nurlita. 2012)

Terlihat bahwa jarak anguler antara dua fasor yang berdekatan pada QPSK adalah  $90^\circ$ . Karena itu, suatu sinyal QPSK dapat mengalami pergeseran fasa  $+45^\circ$  atau  $-45^\circ$  selama transmisi dan tetap akan berupa informasi yang benar saat didemodulasikan pada penerima.



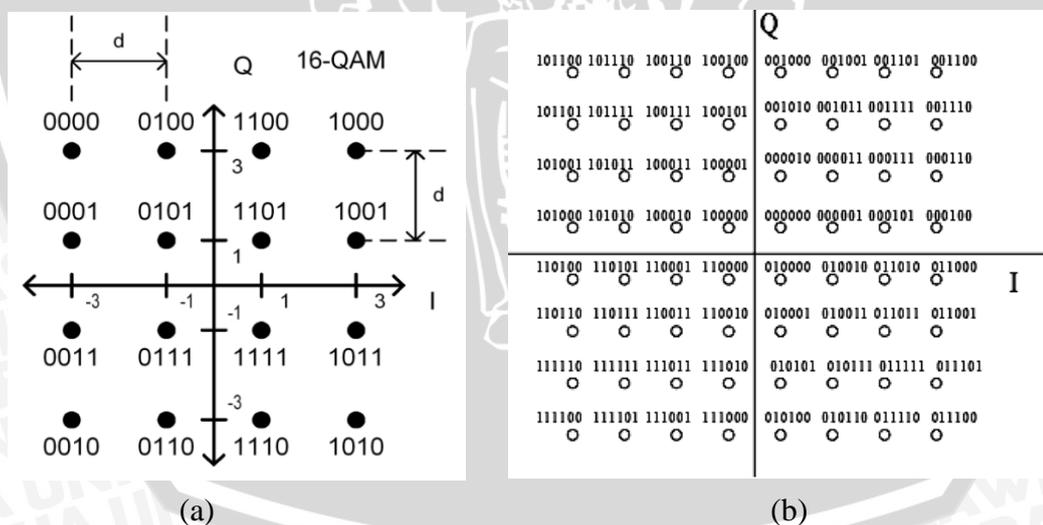
**Gambar 2.12.** Sinyal pada *Quadrature Phase Shift Keying* (QPSK).

(Sumber : Yanuarni, Nurlita. 2012)

### - *Quadrature Amplitude Modulation (QAM)*

*Quadrature Amplitude Modulation (QAM)* merupakan teknik yang mengkombinasikan antara teknik *Amplitude Shift Keying (ASK)* dan teknik *Phase Shift Keying (PSK)*. Berarti pada QAM, amplitudo dan *phase* sinyal *carrier* berubah terhadap perubahan amplitudo sinyal informasi. Sehingga, sinyal direpresentasikan dalam besaran amplitudo dan pergeseran *phase*. Dikatakan *quadrature* karena jumlah minimum bit pada tiap simbolnya adalah 2 bit. Sehingga pada QAM dikenal teknik 4-QAM, 8-QAM, 16-QAM, 32-QAM, 64-QAM, 128-QAM, dan 256-QAM tergantung banyaknya jumlah bit dalam satu simbol. Tetapi sesuai standar yang telah diterapkan oleh 3GPP LTE, teknik QAM yang digunakan pada teknologi LTE adalah 16-QAM dan 64-QAM. (K. Fazel and S. Kaiser, 2008 )

Untuk 16-QAM terdapat 4 bit setiap simbolnya, sehingga disebut juga dengan *quadbit*. Sedangkan untuk 64-QAM terdapat 6 bit pada tiap simbolnya, sehingga disebut juga dengan *hexabit*. Teknik 64-QAM merupakan teknik yang paling cepat mentransmisikan data pada teknologi LTE, karena jumlah bit per simbolnya adalah yang tertinggi dibandingkan dengan teknik modulasi digital yang lain, yaitu 6 bit. Gambar 2.13 menjelaskan hubungan antara amplitudo dan fasa dengan bit pada 16-QAM dan 64-QAM. (Behrouz A. Forouzan, 2000)



**Gambar 2.13** (a) 16-QAM constellation, (b) 64-QAM constellation  
(Sumber : Behrouz A. Forouzan, 2000)

Pada blok demodulator simbol-simbol diubah menjadi bit-bit informasi data kembali sesuai dengan teknik modulasi yang digunakan yaitu QPSK atau QAM.

**c. Transformasi *Fast Fourier* pada Sistem OFDMA**

Simbol OFDMA disusun dalam sebuah frame yang diubah dalam bentuk *domain* waktu dengan menggunakan IFFT (*Inverse Fast Fourier Transform*). IFFT dapat berfungsi sebagai *baseband modulator*, dimana setiap simbol akan memodulasi frekuensi *subcarrier* yang dibangkitkan oleh blok IFFT. Penggunaan IFFT akan menjamin *orthogonalitas* antar *subcarrier*. Orthogonalitas antar tiap *subcarrier* dalam satu kanal transmisi terjadi pada waktu yang berbeda. Keluaran dari setiap proses transformasi IFFT akan membentuk sebuah deretan simbol OFDMA. Blok FFT berfungsi sebagai *baseband demodulator* dengan cara mengubah sinyal wilayah waktu ke wilayah frekuensi. Titik FFT diset sama seperti titik IFFT. Kemudian simbol-simbol disusun kembali sesuai dengan teknik pengalokasian *user* yang digunakan di pemancar.

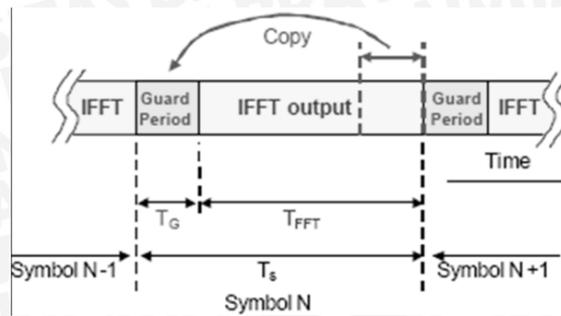
**d. Konverter *Digital to Analog (D/A)* dan *Analog to Digital (A/D)***

Konverter *digital-to-analogue (D/A)* pada sisi pemancar berfungsi untuk mengkonversikan sinyal digital OFDMA ke dalam format analog. Pada sisi penerima, konverter *analog to digital* mengkonversikan sinyal analog OFDMA ke dalam format digital.

**e. *Add/Remove Cyclic Prefix***

Salah satu masalah yang terpenting dalam komunikasi nirkabel adalah *delay spread*. *Delay spread* dapat menimbulkan *Intersymbol Interference (ISI)*. Selain itu, ISI dapat pula terjadi dengan meningkatnya *bandwidth carrier* dan laju simbol *subcarrier*. Untuk mencegah terjadinya ISI maka pada tiap simbol OFDMA disisipkan *guard interval* secara periodik. Bila panjang *guard interval* melebihi *multipath delay*, maka ISI dapat dihilangkan. (Kumar, Amitabh. 2008)

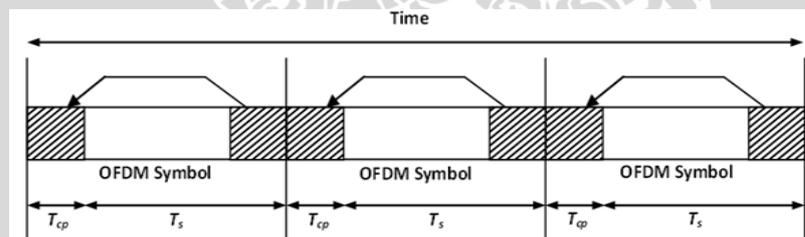
Akan tetapi penggunaan *guard interval* tidak dapat mencegah terjadinya *Interchannel Interference (ICI)* sehingga orthogonalitas antar *subcarrier* tidak mampu dijaga. Untuk mengatasi masalah ini, simbol OFDMA diperpanjang secara *cyclic* dalam *guard interval* atau disebut dengan *cyclic prefix*. Dengan penambahan *cyclic prefix* maka masalah interferensi (ISI dan ICI) yang terjadi pada komunikasi nirkabel dapat diatasi. Proses penambahan *cyclic prefix* dapat dilihat pada Gambar 2.14. ISI dan ICI dapat dicegah jika panjang *cyclic prefix* melebihi panjang *delay spread* maksimum. (Amitabh Kumar, 2008)



**Gambar 2.14.** Penyisipan *Cyclic Prefix* pada Simbol OFDMA.

(Sumber : Eric, Lawrey, 2001)

Proses penambahan *cyclic prefix* ( $T_{cp}$ ) dilakukan pada pemancar terhadap simbol OFDMA. Pada penerima, *cyclic prefix* ( $T_{cp}$ ) akan dipisahkan dari simbol OFDMA. Akibat penambahan *cyclic prefix* ini maka total dari durasi simbol OFDMA untuk masing-masing *subcarrier* adalah durasi simbol OFDMA tanpa *cyclic prefix* ditambah durasi *cyclic prefix*, sehingga total durasi simbol OFDMA adalah  $T_s = T_{sub} + T_{cp}$ . Representasi waktu dari total satu simbol OFDMA dapat digambarkan pada Gambar 2.15 berikut.



**Gambar 2.15.** Representasi Waktu dari OFDMA.

(Sumber : Zhang Di, 2004)

*Bandwidth* antar *subcarrier* setelah penambahan *cyclic prefix* sama dengan *invers* dari durasi simbol tanpa *cyclic prefix*. Secara matematis *bandwidth subcarrier* dapat dituliskan pada persamaan (2.8). dan *bandwidth* sistem dari sejumlah *subcarrier* yang digunakan adalah:

$$\begin{aligned}
 B_{sistem} &= \frac{2}{T_{sub}} + \frac{N-1}{(1-\alpha_{cp}) \cdot T_{sub}} \\
 B_{sistem} &= \frac{2(1-\alpha_{cp}) + N-1}{(1-\alpha_{cp}) \cdot T_{sub}} \\
 B_{sistem} &= \frac{2(1-\alpha_{cp}) + N-1}{(1-\alpha_{cp}) \cdot \frac{N \cdot \log_2 M}{R_{tot}}} \\
 B_{sistem} &= \frac{R_{tot} [2(1-\alpha_{cp}) + N-1]}{(1-\alpha_{cp}) \cdot N \cdot \log_2 M}
 \end{aligned} \tag{2.11}$$

dengan :

- $B_{sistem}$  = bandwidth sistem (Hz)  
 $T_s$  = durasi simbol OFDMA (s)  
 $T_{sub}$  = durasi simbol masing-masing *subcarrier* (s)  
 $T_{cp}$  = durasi *cyclic prefix* (s)  
 $R_{tot}$  = laju bit total yang tersedia (bps)  
 $M$  = jumlah kemungkinan sinyal  
 $N$  = jumlah *subcarrier*  
 $\alpha_{cp}$  = faktor *cyclic prefix* 6.51%

### 2.7.3 Keunggulan dan Kelemahan OFDMA

OFDMA memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan sistem yang lain, diantaranya (Yang, Samuel C, 2010) :

#### a. Pemakaian *Frequency Diversity* dan *Multiuser Diversity*

OFDMA dapat memberikan keuntungan pada *frequency diversity* melalui distribusi *subcarrier* untuk pengguna tunggal. Pendistribusian *subcarrier* pengguna secara acak pada seluruh band dapat berarti beberapa *subcarrier* pengguna memungkinkan tidak akan saling melemahkan. Selain keuntungan diatas, *multiusers diversity* dimana berupa *subcarrier* yang saling bersebelahan. *Multiuser diversity* terjadi karena pengguna yang berbeda pada lokasi yang berbeda yang memungkinkan mengalami respon kanal yang berbeda, sehingga sistem dapat meningkatkan *link* pengguna tertentu dengan menyusun pengguna dengan *subcarrier* yang saling bersebelahan sehingga dihasilkan kondisi kanal yang terbaik.

**b. Kuat terhadap *frequency selective fading***

*Frequency selective fading* merupakan sebuah keadaan yang mana terjadi pelemahan daya secara tidak seragam pada frekuensi tertentu yang diakibatkan *bandwidth* dari kanal lebih sempit daripada *bandwidth* transmisi. Pada sistem OFDMA hal ini dapat dihindari dengan cara menggunakan *subcarrier* yang relatif banyak.

**c. Tidak sensitif terhadap *delay spread***

Dengan dibaginya kecepatan transmisi ke dalam banyak *subcarrier*, maka kecepatan pada *subcarrier* akan menjadi kecil, sehingga periode simbol menjadi lebih panjang yang akhirnya mampu mengurangi terjadinya *delay spread*.

Sedangkan kelemahan OFDMA antara lain:

**a. *Carrier frequency offset (CFO)***

Sistem OFDMA memiliki sensitivitas yang tinggi terhadap CFO yang disebabkan oleh *jitter* pada gelombang pembawa dan juga terhadap efek Doppler yang disebabkan oleh pergerakan stasiun pengirim atau penerima.

**b. *Distorsi nonlinear***

Teknologi OFDMA menggunakan sistem multi-frekuensi dan multi-amplitudo, sehingga sistem ini mudah terkontaminasi oleh *distorsi nonlinear* yang terjadi pada penguat dari daya transmisi.

**c. Sinkronisasi sinyal**

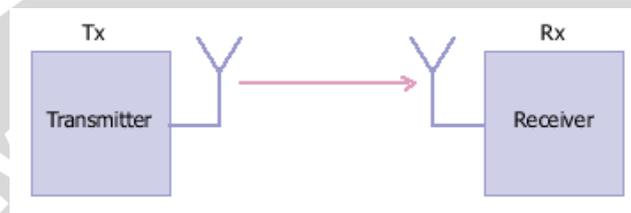
Menentukan *start point* untuk memulai operasi *Fast Fourier Transform (FFT)* ketika sinyal OFDMA tiba di stasiun penerima relatif sulit.

## 2.8 Teknologi Antena Jamak

Antena merupakan alat yang digunakan untuk mengubah sinyal radio yang merambat pada sebuah konduktor menjadi gelombang elektromagnetik di udara dan mentransmisikan sinyal tersebut ke udara. Berdasarkan jumlah antena yang digunakan untuk mentransmisikan sinyal baik di sisi *transmitter* maupun dari *receiver*, maka sistem transmisi dibedakan menjadi 4 macam, yaitu *Single Input Single Output (SISO)* 1x1, *Single Input Multiple Output (SIMO)* 1xN, *Multiple Input Single Output (MISO)* Mx1, dan *Multiple Input Multiple Output (MIMO)* MxN. Dengan M menunjukkan jumlah antena di sisi *transmitter* dan N menunjukkan jumlah antena di sisi *receiver*. Namun pada penelitian ini akan dibahas mengenai penggunaan antena SISO 1x1, SIMO 1x2 dan MIMO 2x2. (Restantia,Fidela.2011)

### 2.8.1 Single Input Single Output (SISO)

Sistem SISO banyak digunakan oleh masyarakat pada umumnya. Sistem ini menggunakan antenna pemancar (Tx) dan penerima (Rx) tunggal untuk mentransmisikan sinyal melalui kanal komunikasi. Teknik ini sering digunakan dalam siaran radio, TV dan teknologi nirkabel pribadi (misalnya Wi-Fi dan *Bluetooth*). Gambar 2.18 menunjukkan model sistem dengan menggunakan SISO. Dalam sistem ini tidak diperlukan metode khusus dalam pentransmisiannya, karena sinyal dari Tx akan langsung dikirim ke Rx.

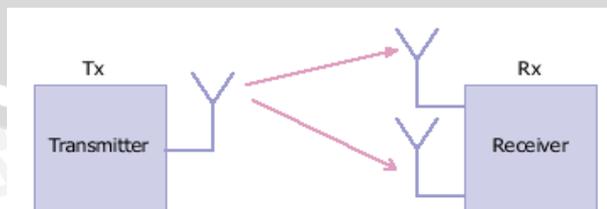


**Gambar 2.16.** Sistem SISO 1x1

(Sumber : [Yanuarni,Nurlita.2012](#))

### 2.8.2 Single Input Multiple Output (SIMO)

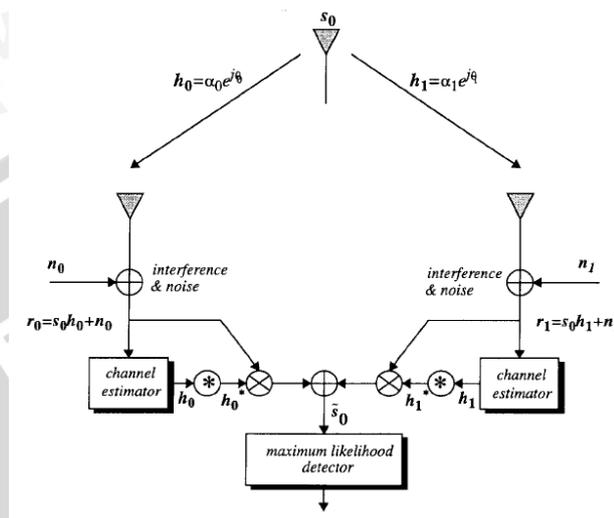
Sistem ini menggunakan antenna pemancar tunggal (Tx) dan sejumlah N antenna penerima (Rx) untuk dapat mentransmisikan sinyal informasi ke beberapa pengguna (sejumlah N *user*). Dengan menggunakan teknik SIMO, penerima dapat memilih antenna terbaik untuk menerima sinyal yang lebih kuat atau menggabungkan sinyal dari semua antenna sedemikian rupa sehingga memaksimalkan SNR (*Signal to Noise Ratio*). Teknik yang pertama dikenal dengan *switched diversity* atau *selection diversity*. Dan teknik yang kedua dikenal sebagai MRC (*Maximal Ratio Combining*). Implementasi SIMO 1x2 ini banyak dipakai pada sisi uplink LTE. Model sistem SIMO dengan 1 antenna *transmitter* dan 2 antenna *receiver* dapat dilihat pada Gambar 2.19.



**Gambar 2.17** Sistem SIMO 1x2

(Sumber : [Yanuarni,Nurlita.2012](#))

Pada gambar Pada Gambar 2.28 menunjukkan model MRC. *Bit stream* yang ditransmisikan dinyatakan dengan  $(s_0, s_1, \dots, s_n)$ . Kanal antara antenna pemancar pertama dengan penerima dinyatakan dengan  $h_0$ , kanal antara antenna pemancar dengan penerima dinyatakan dengan  $h_1$ . Diasumsikan dan . Sinyal yang diterima oleh penerima adalah  $r_0 = h_0 s_0 + n_0$  dan  $r_1 = h_1 s_1 + n_1$  dengan  $n_0$  dan  $n_1$  adalah derau kompleks Gaussian.



**Gambar 2.18** Skema *Maximal Ratio Combining*  
(Sumber : Alamouti, Siavash M.1998)

Penerima mengestimasi simbol menggunakan Persamaan :

$$Y = h_0^* r_0 + h_1^* r_1 = |h_0|^2 s_0 + |h_1|^2 s_0 + h_0^* n_0 + h_1^* n_1 \quad (2.12)$$

sehingga *combiner-output* SNR setelah melewati MRC, dengan  $v =$  jumlah antenna penerima

$$z_{comb[k]} = (\sum_{v=1}^N |h_{v,1}|^2) x_1[k] + (\sum_{v=1}^N h_{v,1}^* n_v[k]) \quad (2.13)$$

dan menghasilkan SNR SIMO 1x2 sebagai berikut : (Mietzner, Jan. tanpa tahun)

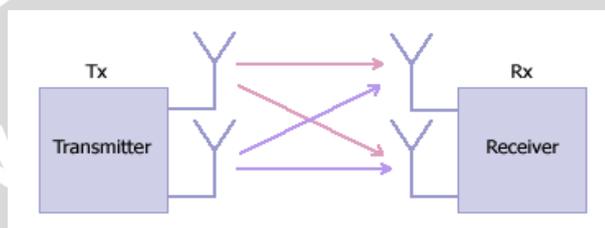
$$SNR_{comb} = \frac{(\sum_{v=1}^N |h_{v,1}|^2 + |h_{v,2}|^2) \sigma_{x_1}^2}{\sigma_{n_0}^2 + \sigma_{n_1}^2} = \frac{(2 \sum_{v=1}^N |h_{v,1}|^2) \sigma_{x_1}^2}{2 \sigma_n^2} = \gamma_v \quad (2.14)$$

### 2.8.3 Multiple Input Multiple Output (MIMO)

Pada sistem komunikasi nirkabel, sinyal transmisi akan mengalami kerusakan akibat adanya *fading*, sehingga akan menurunkan performansi sistem. Di sisi lain, tuntutan peningkatan laju data dan kualitas layanan sistem komunikasi nirkabel semakin tinggi sehingga memicu lahirnya teknik-teknik baru untuk meningkatkan efisiensi spektral dengan tetap mempertahankan kualitas. Salah satu caranya adalah dengan

menggunakan antena jamak di sisi pengirim dan penerima atau dikenal dengan teknik *Multiple Input Multiple Output* (MIMO).

Sistem ini menggunakan sejumlah M antena pemancar (Tx) dan sejumlah N antena penerima (Rx) untuk dapat mentransmisikan sinyal (informasi). Sebuah sistem MIMO dengan jumlah yang sama pada kedua antena pemancar dan penerima mampu melipatgandakan *throughput* sistem, linier sesuai dengan jumlah antena tambahan. Sistem ini banyak diimplementasikan pada sisi *downlink* LTE. Model sistem MIMO dengan 2 antena *transmitter* dan 2 antena *receiver* dapat dilihat pada Gambar 2.19.



**Gambar 2.19** Sistem MIMO 2x2

(Sumber : [Yanuarni,Nurlita.2012](#))

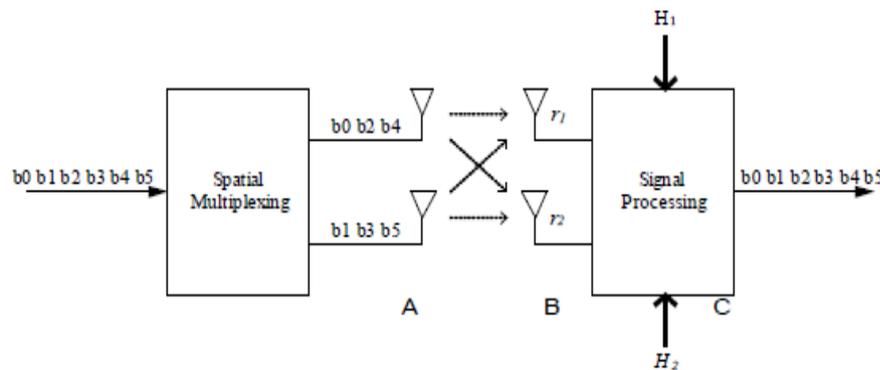
MIMO seringkali menggunakan teknik SM (*Spatial Multiplexing*) dan *Space Time Block Code* (STBC)

- **SM (*Spatial Multiplexing*)**

Teknik pertama yang digunakan adalah teknik MIMO 2x2 yang disebut matriks  $B = (s_1, s_2)^T$  atau *Spatial Multiplexing* (SM) dengan tujuan untuk mencapai kapasitas kanal yang besar. Pada SM, aliran data berlaju tinggi dipecah-pecah menjadi sejumlah aliran paralel sesuai dengan jumlah antena pemancar. Sebelum memasuki antena, aliran-aliran data ini dilewatkan pada matriks khusus yang berfungsi menggabungkan sinyal dari semua aliran dengan kombinasi tertentu untuk dipancarkan melalui masing-masing antena.

Prinsip dari SM adalah deretan simbol yang akan dikirim dipecah menjadi beberapa paralel deretan simbol yang kemudian ditransmisikan secara simultan dengan laju rata-rata  $1/M$  dari laju aliran data aslinya **dan** dengan *bandwidth* yang sama pada masing-masing antena. Jika diasumsikan terdapat saluran umpan balik informasi dari penerima ke pemancar, penerima dapat melakukan estimasi respons kanal dan mengumpunbalikkan informasi ini kepada pemancar. Pemancar kemudian dapat mengetahui bagaimana seharusnya menata matriks multipleks agar dapat peningkatan kapasitas kanal yaitu sebesar M kali. Jumlah N antena penerima yang dipasang selalu lebih besar atau sama

dengan jumlah antenna pemancar, sehingga  $M \leq N$ . Skema multipleksing ditunjukkan oleh Gambar 2.20.



**Gambar 2.20** Skema *Spatial Multiplexing*

(Sumber : Jeffrey M. Gilbert, 2005)

Jika simbol yang dikirim oleh pengirim  $Tx_0$  dan  $Tx_1$  adalah  $s_0$  dan  $s_1$  dengan  $h_{ji}$  adalah respon kanal dari  $Tx_i$  ke  $Rx_j$  dengan  $i, j = 1, 2$  maka sinyal yang diterima oleh penerima  $Rx_0$  dan  $Rx_1$  adalah sebagai berikut.

$$r_0 = h_{00}s_0 + h_{01}s_1 + n_0 \quad (2.15)$$

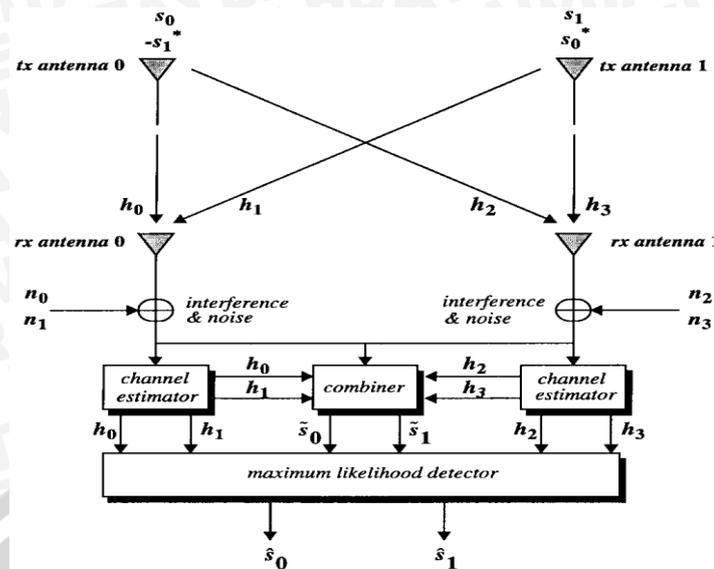
$$r_1 = -h_{10}s_1^* + h_{11}s_0^* + n_1$$

Dalam bentuk matriks adalah sebagai berikut.

$$\begin{pmatrix} r_0 \\ r_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{00} & h_{01} \\ h_{10} & h_{11} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s_0 \\ s_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} n_0 \\ n_1 \end{pmatrix} \quad (2.16)$$

#### - STBC (*Space Time Block Code*)

Sistem pengkodean blok STBC (*space time block codes*) hasil temuan Siavash Alamouti pada tahun 1998 yang penerapannya terbatas pada sistem dengan dua antenna pemancar. Pada sistem STBC ala Alamouti, aliran data yang sama dipancarkan melalui kedua antenna pemancar. Namun setiap antenna mengalami perlakuan yang berbeda. Skema sistem STCB ditunjukkan oleh Gambar 2.21.



Gambar 2.21 Skema Space Time Block Code (STBC)

(Sumber : Alamouti, Siavash M.1998)

Penerima mengestimasi simbol menggunakan Persamaan :

$$\begin{aligned}\tilde{s}_0 &= (|h_0|^2 + |h_1|^2 + |h_2|^2 + |h_3|^2)s_1 + h_1^*n_1 + h_2^*n_2 + h_3^*n_3 + h_4n_4^* \quad (2.17) \\ \tilde{s}_1 &= (|h_0|^2 + |h_1|^2 + |h_2|^2 + |h_3|^2)s_2 + h_2^*n_1 - h_1n_2^* + h_4^*n_3 - h_3n_4^*\end{aligned}$$

Sehingga combiner-output SNR setelah melewati ML,  $v$  = jumlah antena penerima

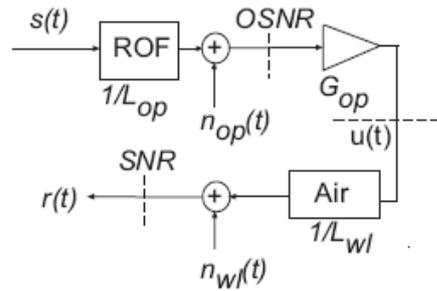
$$z_{comb}[k] = (\sum_{v=1}^N [h_{v,1}]^2)(s_0 + s_1) + (\sum_{v=1}^N h_{v,1}^* n_v[k]) \quad (2.18)$$

Dan menghasilkan SNR MIMO 2x2 sebagai berikut : (Mietzner, Jan. tanpa tahun)

$$\begin{aligned}SNR_{comb} &= \frac{(\sum_v [h_{1,1}]^2 + [h_{1,2}]^2 + [h_{2,1}]^2 + [h_{2,2}]^2) \sigma_{x_1}^2(k) + \sigma_{x_2}^2(k)}{\sigma_{n_1}^2 + \sigma_{n_2}^2 + \sigma_{n_3}^2 + \sigma_{n_4}^2} \quad (2.19) \\ &= \frac{(2 [h_{v,1}]^2) \sigma_{x_1}^2(k) + \sigma_{x_2}^2(k)}{4 \sigma_n^2} = \frac{1}{2} \gamma_v\end{aligned}$$

## 2.9 Performansi Sistem MIMO-OFDMA pada Teknologi Radio over Fiber (RoF)

Pada aplikasi sistem OFDMA pada teknologi Radio over Fiber (RoF) terdapat beberapa proses dan rugi-rugi yang mempengaruhinya. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 2.22:



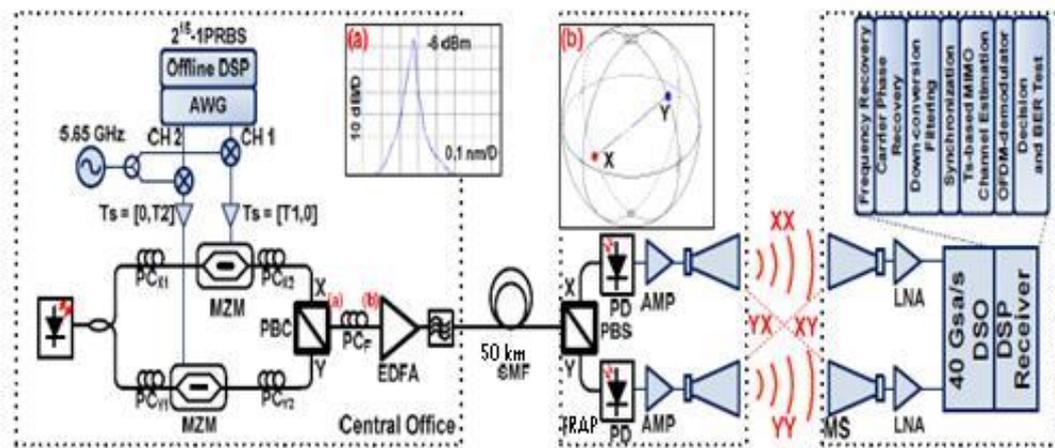
**Gambar 2.22.** Blok Diagram *Losses*, Penguatan, serta *Noise* pada RoF

(Sumber: Xavier Fernando, 2004)

Gambar 2.22 menggambarkan proses jalannya sinyal RoF yang mengalami *losses*, penguatan, maupun *noise*.  $s(t)$  adalah sinyal RF yang dikirimkan dari BTS/eNB. 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 OSNR (*Optical Signal to Noise Ratio*). Sebelum dipancarkan kembali melalui antenna di *remote antenna unit*, sinyal keluaran optik dikuatkan oleh  $G_{op}$  supaya level dayanya sama dengan level daya yang dibutuhkan antenna.  $u(t)$  adalah sinyal yang dipancarkan antenna ke *mobile station*. Sinyal ini mengalami *losses* propagasi, yaitu  $L_{wl}$  dan mengalami *noise* transmisi,  $n_{wl}$  yang berupa AWGN.  $r(t)$  adalah sinyal yang diterima oleh *user*. Perbandingan sinyal yang diterima di sisi penerima dengan *noise* dan rugi-rugi total di seluruh sistem adalah *Signal to Noise Ratio*. (Xavier,Fernando.2004)

Untuk mengoptimalkan jaringan pada sistem *Radio over Fiber* dengan menghasilkan SNR yang semakin baik di sisi penerima, maka pada skripsi ini digunakan pengaplikasian teknik antenna jamak pada sisi pemancar dan penerima. Teknik antenna jamak yang digunakan adalah *Multiple Input Multiple Output* (MIMO).

MIMO adalah salah satu contoh teknologi dengan kualitas yang baik dari LTE pada kecenderungan teknologi yang berkembang saat ini, dimana teknologi dewasa ini untuk menciptakan frekuensi yang lebih efisien. Teknologi seperti MIMO dapat menghasilkan frekuensi yang efisien yaitu dengan mengirimkan informasi yang sama dari dua atau lebih pemancar terpisah kepada sejumlah penerima, sehingga mengurangi informasi yang hilang dibanding bila menggunakan sistem transmisi tunggal.(You Xiaohu.2004)



Gambar 2.23. Arsitektur MIMO-OFDMA pada Radio over Fiber

(Sumber : M.B Othman, 2011 )

Untuk mengetahui pengaruh dari antenna jamak MIMO 2x2 terhadap performansi OFDMA pada Radio over Fiber (RoF) yang dibandingkan dengan antenna jamak SIMO 1x2 dan SISO 1x1, dibutuhkan beberapa parameter yang akan digunakan dalam analisis. Beberapa parameter performansi yang akan dibahas dalam penelitian ini antara lain yaitu :

**a. Redaman Propagasi Ruang Bebas**

Pada propagasi gelombang radio, semakin jauh jarak antara pemancar dan penerima akan mengakibatkan daya sinyal yang diterima oleh penerima semakin kecil. Hal ini disebabkan adanya redaman saat pentransmision sinyal dari pemancar ke penerima maupun sebaliknya, baik pada kondisi *line of sight* (LOS) maupun *non-line of sight* (NLOS), maka *pathloss* (PL) pada saluran dapat ditentukan dengan pemodelan *Erceg* sebagai berikut (Kwang-Cheng Chen, 2008) :

$$PL = A + 10\gamma \log_{10} \left( \frac{d}{d_o} \right) + s + \Delta PL_f + \Delta PL_h \tag{2.20}$$

dengan :

- $PL$  = rugi-rugi propagasi (dB)
- $A$  = *pathloss* referensi (dB)
- $\gamma$  = eksponen *pathloss*
- $d$  = jarak pemancar ke penerima (m)
- $d_o$  = jarak referensi *pathloss* (100 m)



- $s$  = efek *shadow* (dB)  
 $\Delta PL_f$  = faktor koreksi terhadap frekuensi kerja yang digunakan  
 $\Delta PL_h$  = faktor koreksi terhadap tinggi antenna penerima

dengan *pathloss* referensi (A) dirumuskan sebagai berikut :

$$A = 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi \cdot f \cdot d}{c} \right) \quad (2.21)$$

dengan :

- $A$  = *pathloss* referensi (dB)  
 $f$  = frekuensi operasi (Hz)  
 $d$  = jarak pemancar ke penerima (m)  
 $c$  = kecepatan gelombang radio di udara (m/s)

dengan eksponen *pathloss* ( $\gamma$ ) dirumuskan sebagai berikut :

$$\gamma = a - b \cdot h_b + \frac{c}{h_b} \quad (2.22)$$

dengan :

- $\gamma$  = eksponen *pathloss*  
 $a, b, c$  = konstanta yang tergantung pada tipe *terrain*  
 $h_b$  = tinggi antenna *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 2.3.** 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 Chen and J. Roberto B. de Marca, 2008)

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.

Faktor koreksi frekuensi pada LTE dinyatakan dalam:

$$\Delta PL_f = 6 \log_{10} \left( \frac{f}{2000} \right) \quad (2.23)$$

dengan :

$f$  = frekuensi operasi sistem (Hz)

Sedangkan untuk faktor koreksi tinggi antenna *subscriber station* pada LTE dinyatakan dalam persamaan berikut :

$$\Delta PL_h = -10,8 \log_{10} \left( \frac{h}{2} \right), \text{ untuk tipe } terrain \text{ A dan B} \quad (2.24)$$

$$\Delta PL_h = -20 \log_{10} \left( \frac{h}{2} \right), \text{ untuk tipe } terrain \text{ C} \quad (2.25)$$

dengan :

$h$  = tinggi antenna penerima (m)

#### b. *Signal to Noise Ratio (SNR)*

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

$$SNR = OSNR \left[ \frac{1}{1 + \left( \frac{L_{wl}}{G_{op}} \right)^2} \right] \quad (2.26)$$

dimana,

$$OSNR = \frac{m^2 I_D^2 10^{-L_{op}/10} P_{RFIn}}{E[n_{op}^2(t)]} \quad (2.27)$$

dengan:

SNR = *signal to noise ratio* (dB)

OSNR = *optical signal to noise ratio* (dB)

m = indeks modulasi optik

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

$E [s^2(t)]$  = sinyal saluran nirkabel (dB)

$P_{RF,in}$  = daya masukan RF (daya pancar) (dBm)

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

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

$L_{el}$  = rugi-rugi propagasi (dB)

$G_{op}$  = gain *amplifier* optik (dBi)

Besarnya nilai SNR sistem yang menggunakan *air interface* OFDMA diperoleh dari persamaan berikut (Hara, 2003) :

$$SNR_{sistem} = (1 - \alpha_{CP}) SNR \quad (2.28)$$

dengan :

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

SNR = *signal to noise ratio* (dB)

$\alpha_{cp}$  = faktor *cyclic prefix*

Nilai SNR sebuah sistem juga dipengaruhi oleh jumlah antena yang digunakan. Pada suatu teknologi antena jamak dengan M antena *transmitter* dan N antena *receiver*, akan terdapat M buah sinyal dengan besar daya masing-masing P/M untuk ditransmisikan. Kemudian pada *receiver* sinyal-sinyal ini idealnya akan dijumlahkan secara koheren, sehingga dayanya mengalami peningkatan sebesar  $N^2$  kali. Pada sisi lain, *noise* dari sinyal tersebut juga mengalami peningkatan daya namun penambahannya tidak koheren, sehingga dayanya hanya akan meningkat sebesar N kali lipat. SNR teknik antena jamak dapat dituliskan sebagai berikut :

$$SNR_{sistem} = \frac{N^2 x P/M}{NxN_o} = \frac{NxP}{MxN_o} = \frac{N}{M} x SNR \quad (2.29)$$

dengan :

$SNR_{sistem}$  = *signal to noise ratio* sistem teknik antena jamak (dB)

$SNR$  = *signal to noise ratio* sistem (dB)

$M$  = jumlah antena *transmitter*

$N$  = jumlah antena *receiver*

### c. Kapasitas Kanal Sistem

Kapasitas kanal adalah ukuran kemampuan kanal untuk dapat menerima seberapa banyak data yang akan dikirim. Dalam teorema Shannon, nilai kapasitas kanal sistem dipengaruhi nilai *bandwidth* dan SNR sistem. Kapasitas kanal untuk kondisi kanal AWGN sistem antena jamak dapat diperoleh dengan persamaan :

$$C_{sistem} = M \times B \log_2(1 + SNR_{sistem}) \quad (2.30)$$

dengan :

$C_{sistem}$  = kapasitas kanal sistem antena jamak (bps)

$M$  = jumlah antena *transmitter*

$B_{sistem}$  = *bandwidth* sistem (Hz)

$SNR_{sistem}$  = *signal to noise ratio* sistem

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

$$B_{sistem} = \frac{0.44}{\Delta\tau_{sistem} \times L_f} \quad (2.31)$$

Dimana  $\Delta\tau_{sistem}$  adalah *rise time* pada sistem fiber optik yang dalam pendekatannya total *rise time* ( $\Delta\tau_{sistem}$ ) dari suatu *link* adalah akar kuadrat dari *rise time* tiap-tiap contributor  $t_i$  terhadap degradasi pulsa *rise time* :

$$\Delta\tau_{sistem} = \sqrt{(\Delta\tau_{sumber})^2 + (\Delta\tau_{receiver})^2 + (\Delta\tau_{mat})^2} \quad (2.32)$$

dengan:

$L_f$  = 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/kromatik (ps)

#### d. Bit Error Rate (BER)

*Bit Error Rate* (BER) atau dengan sebutan lain probabilitas *bit error* 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 dengan rentang nilai BER 0-1. BER dipengaruhi oleh nilai  $E_b/N_o$  yang digunakan untuk menentukan laju data digital.  $E_b/N_o$  dapat didefinisikan sebagai perbandingan energi sinyal per bit terhadap noise. Perhitungan nilai  $E_b/N_o$  dijelaskan dalam persamaan : (E.Glatz, 2001)

$$\frac{E_b}{N_o} = SNR_{sistem\ antenna\ jamak} - 10 \log \frac{B_{sistem}}{R} \quad (2.33)$$

BER pada penelitian ini hanya menggunakan sistem dengan teknik modulasi 64-QAM yang dapat dihitung dengan persamaan : (E.Glatz, 2001)

$$P_{b,M-QAM} = \frac{2(\sqrt{M_s}-1)}{\sqrt{M_s} \log_2 M_s} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{3 \log_2 M_s E_b}{4(M_s-1) N_o}} \right) \quad (2.34)$$

dengan :

$P_{b,M-QAM}$  = probabilitas *bit error* pada saat transmisi menggunakan modulasi M- QAM

$M_s$  = jumlah simbol sesuai teknik modulasi

$\frac{E_b}{N_o}$  = rasio *energy bit* terhadap *noise* (dB)

$\operatorname{erfc}$  = *error function complementary*

dimana  $\operatorname{erfc}(x) \approx \frac{1}{\sqrt{\pi x}} e^{-x^2}$

#### e. Link Power Budget

*Link Power Budget* adalah perhitungan dari semua gain dari pemancar dan penerima setelah melalui redaman di berbagai media transmisi hingga akhirnya diterima oleh penerima di dalam sebuah sistem telekomunikasi. *Link Power Budget* akan

memperhitungkan besarnya redaman dari sinyal termasuk di dalamnya berbagai macam redaman propagasi yang dipancarkan selama proses propagasi berlangsung. Perhitungan *link power budget* pada sistem RoF terdiri dari 2 tahapan perhitungan diantaranya perhitungan *link power budget* pada sisi kabel yaitu sistem komunikasi serat optik dan perhitungan *link power budget* pada sisi nirkabel yang menggunakan aplikasi antena jamak

Perhitungan terhadap kebutuhan daya dalam suatu *link* sistem komunikasi serat optik yang harus dipenuhi agar didapatkan performansi sistem sebagaimana yang diinginkan. Besarnya *power budget system* harus lebih besar dari redaman total dari saluran. Redaman total adalah besarnya rugi-rugi yang disebabkan oleh komponen-komponen komunikasi serat optik yang digunakan dalam sistem. *Link Power Budget* dapat diketahui dengan menghitung selisih antara daya optik yang dipancarkan *optical transmitter* dengan daya optik terendah yang masih dapat dideteksi oleh *optical receiver*, dengan persamaan sbb:

$$P_{tx} - P_{rx} = a_{total} + SM \quad (2.35)$$

dengan :

$P_{tx}$  = Daya *output* pemancar (dBm)

$P_{rx}$  = Sensitifitas penerima (dBm)

$a_{total_s}$  = Rugi-rugi saluran serat optik (dBm)

$SM$  = *Safety margin* (dB)

Secara umum *loss* pada suatu link transmisi serat optik disebabkan oleh komponen berikut:

- Loss* serat optik
- Loss* akibat penyambungan (*splicing*)
- Loss* akibat konektor
- Loss* akibat *splitter*
- Loss* akibat *coupler*

Secara Matematis persamaan redaman total pada sistem adalah sebagai berikut (PT.Telkom,2000):

$$a_{total} = (a_f L_f) + (n_s l_s) + (n_c l_c) + (n_{sp} l_{sp}) + (L_{coupler}) \quad (2.36)$$

dengan :

$a_{total}$  = Redaman Total (dB)

$\alpha_f$  = rugi serat optik (dB)

$L_f$  = Panjang serat optik (km)

$n_s$  = Jumlah sambungan

$l_s$  = Rugi sambungan (dB)

$n_c$  = Jumlah Konektor

$l_c$  = Rugi konektor (dB)

$n_{sp}$  = Jumlah *splitter*

$l_{sp}$  = Rugi *splitter* (dB)

$L_{coupler}$  = Rugi coupler (dB)

Perhitungan *Link Power Budget* kedua adalah pada teknologi nirkabel yang menggambarkan alur propagasi sinyal mulai dari sisi pengirim hingga ke sisi penerima pada jaringan LTE di kanal AWGN. Adapun rumus untuk menentukan performansi *Link Power Budget* yaitu :

$$P_{tx} + G_{tx} - A_{pl} + G_{rx} - A_m = P_{rx} \quad (2.37)$$

dengan:

$P_{tx}$  = sinyal pancar yang dikeluarkan oleh pengirim (dBm)

$G_{tx}$  = Gain atau penguat yang ada di sisi pengirim (dBi)

$A_{pl}$  = Besarnya redaman yang terjadi selama proses propagasi (dBm)

$G_{rx}$  = Gain atau penguatan sinyal di sisi penerima setelah melalui proses propagasi (dBi)

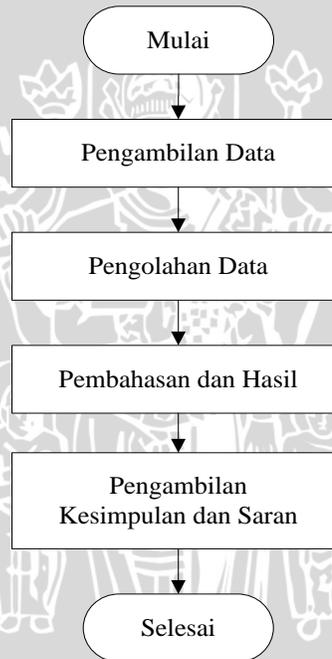
$A_m$  = *miscellaneous attenuation* (dBm)

$P_{rx}$  = Sinyal pancar yang sampai di penerima (dBm)

## BAB III

### METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan kajian bersifat analisis yang bertujuan untuk menganalisis pengaruh penggunaan antenna jamak MIMO 2x2, SIMO 1x2 dan SISO 1x1 terhadap performansi OFDMA pada *Radio over Fiber* (RoF). Susunan langkah yang akan dilakukan untuk mendapatkan solusi dari permasalahan dalam penelitian ini yaitu pengambilan data, pengolahan data, pembahasan dan hasil, serta pengambilan kesimpulan dan saran.



**Gambar 3.1** Langkah penyusunan penelitian  
(Sumber : Perencanaan, 2013)

#### 3.1 Pengambilan Data

Pada penelitian ini, pengambilan data berupa data sekunder. Data sekunder adalah data yang didapat secara tidak langsung yang bersumber dari buku referensi, jurnal, skripsi dan internet mengenai *radio over fiber*, OFDMA, MIMO 2x2, SIMO 1x2 dan SISO 1x1. Studi literatur dilakukan untuk memperoleh pemahaman secara teori mengenai bahasan yang digunakan dalam penelitian ini. Studi literatur juga digunakan untuk mendapatkan

pembahasan dari rumusan masalah mengenai pengaruh kinerja MIMO 2x2 terhadap performansi OFDMA pada *Radio over Fiber* dibandingkan dengan SIMO 1x2 dan SISO 1x1. Teori-teori yang dipelajari dalam penelitian ini meliputi:

- *Long Term Evolution (LTE) release 8*  
Meliputi pengertian, konsep dasar LTE, spesifikasi LTE dan arsitektur jaringan LTE dikhususkan pada sisi *downlink* LTE
- *Radio over Fiber (RoF)*  
Meliputi pengertian, konsep dasar, spesifikasi serta arsitektur *Radio over Fiber*. Selain itu juga teori tentang kelebihan dan kekurangan penerapan teknologi *Radio over Fiber* serta implementasinya.
- *Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA)*  
Meliputi pengertian OFDMA, blok diagram OFDMA yang terdiri dari konversi serial ke paralel (S/P) dan konversi paralel ke serial (P/S), modulator dan demodulator, transformasi *fast fourier*, dan *cyclic prefix*, serta kelebihan dan kekurangan penggunaan OFDMA.
- Teknologi antena jamak, khususnya *Multiple Input Multiple Output (MIMO)*  
Meliputi teori dasar dan pengertian teknik antena jamak serta konseptual SISO 1x1, SIMO 1x2 dan MIMO 2x2. Selain itu dijelaskan juga skema sistem yang dipakai pada antena jamak MIMO 2x2

### 3.2 Pengolahan Data

Pengolahan data dilakukan untuk memperoleh hasil perhitungan dari masalah pada penelitian ini yaitu mengenai analisi pengaruh penggunaan teknik antena jamak MIMO 2x2, SIMO 1x2 dan SISO 1x1 terhadap performansi OFDMA pada *Radio over Fiber (RoF)*. Pengolahan data yang dilakukan adalah secara matematis yaitu perhitungan data dilakukan dengan cara mengumpulkan beberapa nilai parameter dari data sekunder berupa spesifikasi OFDMA pada *downlink* LTE yang sesuai dengan standar 3GPP *release 8*, serta spesifikasi dari teknologi *Radio over Fiber*. Data sekunder tersebut kemudian diolah kedalam rumus-rumus yang telah didapatkan dari studi literatur. Pengolahan data dalam penelitian ini dilakukan dengan menggunakan software matlab 7.04.

Perhitungan dan analisis data yang dilakukan dalam penelitian ini meliputi performansi sebagai berikut:

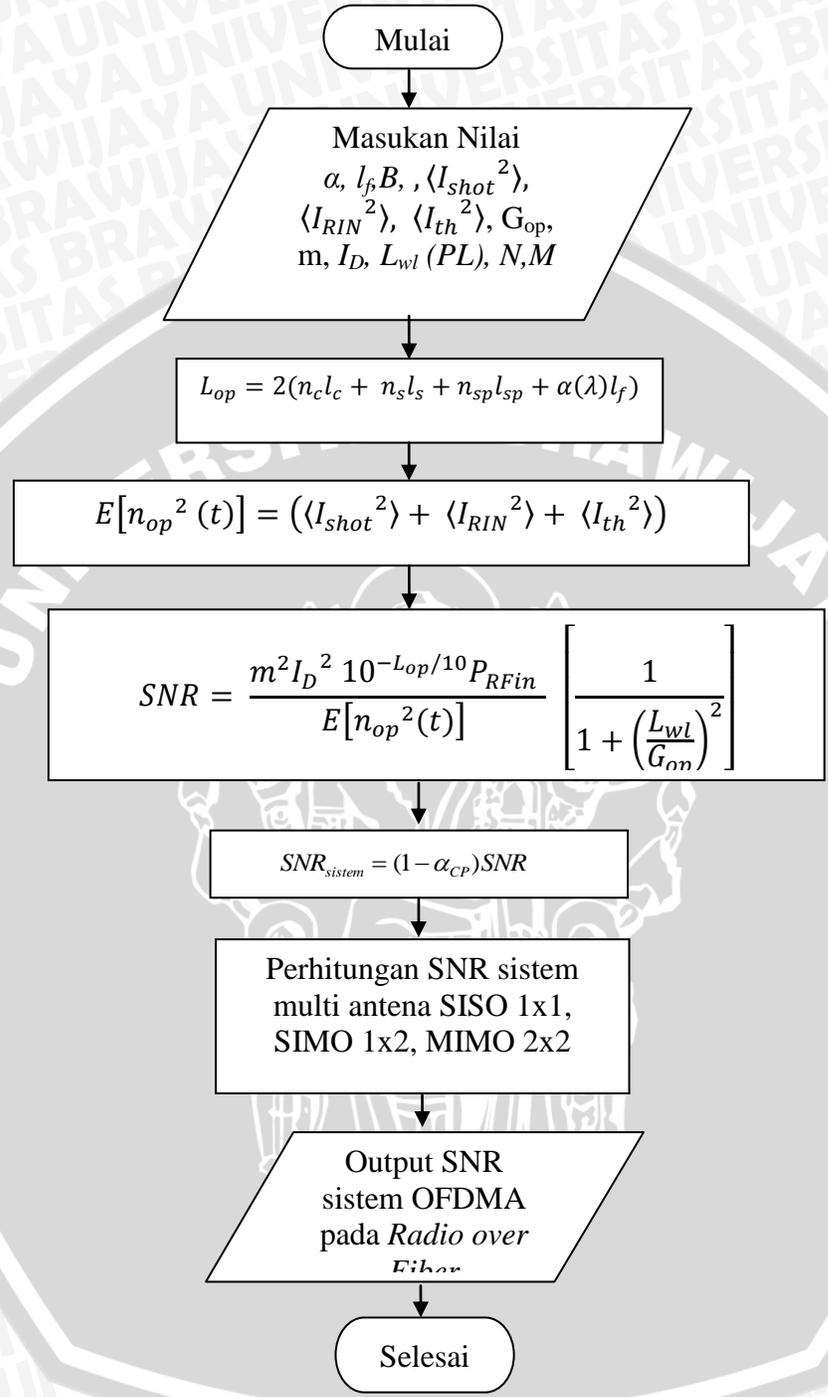
1. *Signal-to-noise ratio* (SNR)
2. Kapasitas kanal
3. *Bit error rate* (BER)
4. *Link Power Budget*

Variabel bebas yang digunakan dalam penelitian ini adalah variasi jarak antara *enodeB/Radio Access Unit* sebagai pemancar dan *User Equipment* (UE) sebagai penerima yang dimulai dari 500 m sampai 3000 m, serta variasi panjang gelombang serat optik yang digunakan yaitu 1550 nm dan 1310 nm pada variasi penggunaan antena jamak MIMO 2x2, SIMO 1x2 dan SISO 1x1 berdasarkan ITU-T G.652.

Pengolahan data untuk mendapatkan performansi-performansi yang diinginkan dapat dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut :



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



Gambar 3.2. Diagram Alir Perhitungan *Signal To Noise Ratio* (SNR) Sistem.

(Sumber: Perencanaan, 2013)

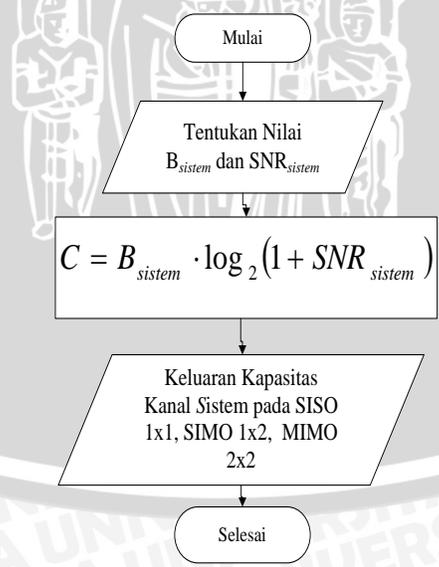
dengan :

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)
- $\alpha_{cp}$  = faktor *cylic prefix*
- $\alpha$  = 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*
- $M$  = jumlah antena *transmitter*
- $N$  = jumlah antena *receiver*

2. Perhitungan kapasitas kanal sistem (C), dengan cara :

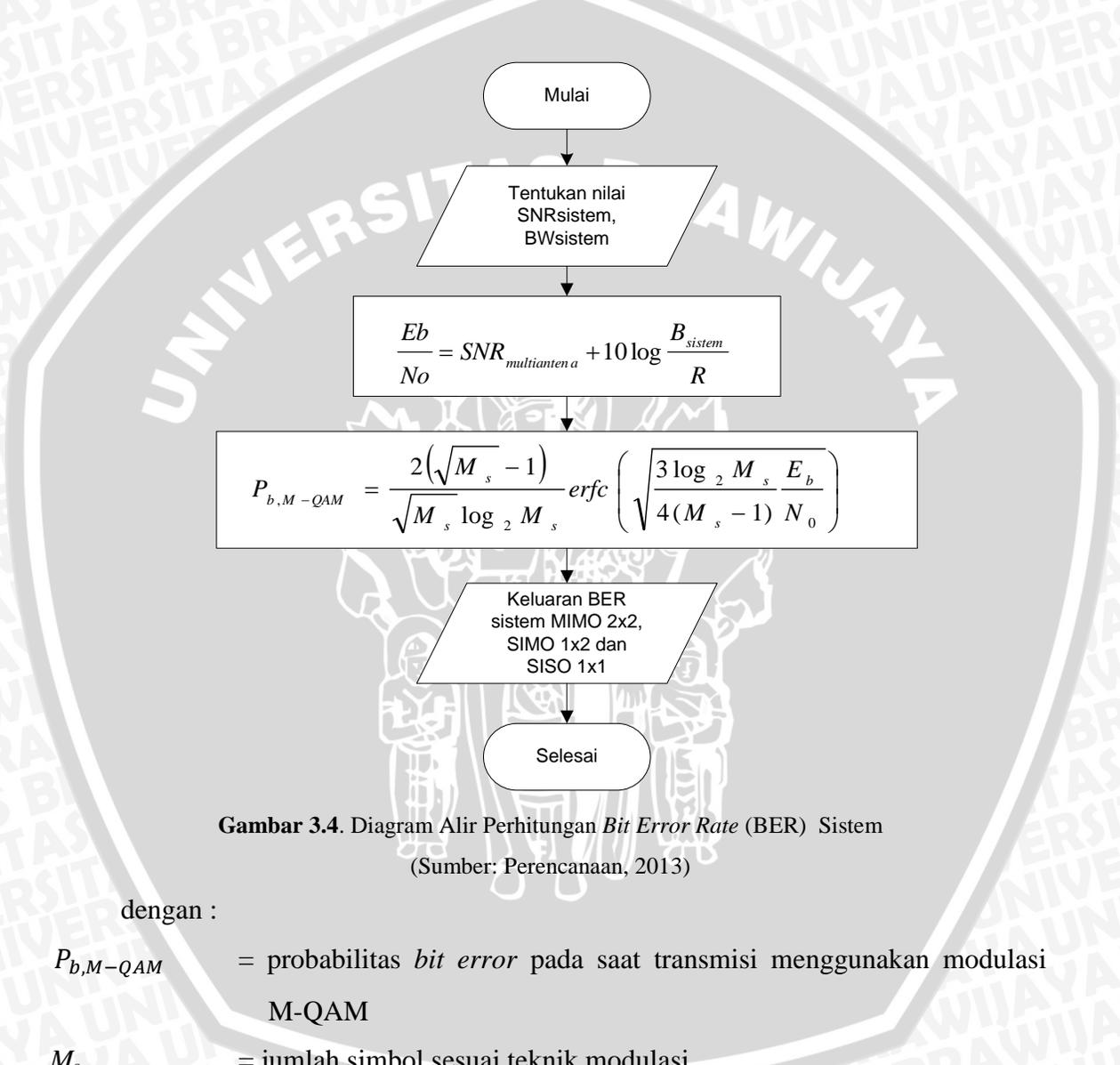


**Gambar 3.3.** Diagram Alir Perhitungan Kapasitas Kanal Sistem  
(Sumber: Perencanaan,2013)

dengan :

- $C_{sistem}$  = kapasitas kanal sistem multi antenna (bps)
- $B_{sistem}$  = bandwidth sistem (Hz)
- $SNR_{sistem}$  = signal to noise ratio sistem multi antenna (dB)

3. Perhitungan *bit error rate* sistem, dengan cara:

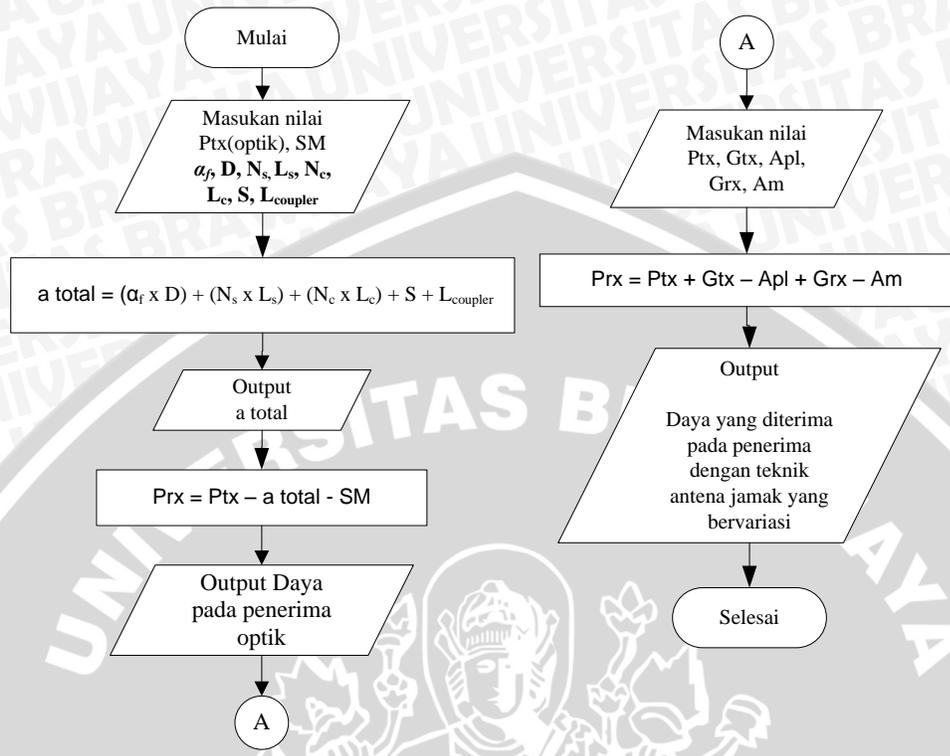


**Gambar 3.4.** Diagram Alir Perhitungan *Bit Error Rate* (BER) Sistem  
(Sumber: Perencanaan, 2013)

dengan :

- $P_{b,M-QAM}$  = probabilitas *bit error* pada saat transmisi menggunakan modulasi M-QAM
- $M_s$  = jumlah simbol sesuai teknik modulasi
- $\frac{E_b}{N_0}$  = rasio *energy bit* terhadap *noise* (dB)
- erfc = *error function complementary*
- R = laju data (bps)

4. Perhitungan *Link Power Budget*



**Gambar 3.5.** Diagram alir perhitungan *Link Power Budget*  
(Sumber: Perencanaan, 2013)

dengan,

- $P_t$  = *Power Budget* (dBm)
- $P_s$  = *Daya Output* pemancar (dBm)
- $P_r$  = Sensitifitas penerima (dBm)
- a total = Redaman Total (dB)
- $\alpha_f$  = rugi serat optik (dB)
- D = Panjang serat optik (km)
- $N_s$  = Jumlah sambungan
- $L_s$  = Rugi sambungan (dB)
- $N_c$  = Jumlah Konektor
- $L_c$  = Rugi konektor (dB)
- S = Rugi *splitter* (dB)
- $L_{coupler}$  = Rugi *coupler* (dB)

$M$	= <i>Margin system</i> (dB)
$P_{tx}$	= sinyal pancar yang dikeluarkan oleh pengirim (dBm)
$G_{tx}$	= Gain atau penguat yang ada di sisi pengirim (dBi)
$A_{pl}$	= Besarnya redaman yang terjadi selama proses propagasi
$G_{rx}$	= Gain atau penguatan sinyal di sisi penerima (dBi)
$A_m$	= <i>miscellaneous attenuation</i>
$P_{rx}$	= Sinyal pancar yang sampai di penerima (dBm)

### 3.3 Pengambilan Kesimpulan dan Saran

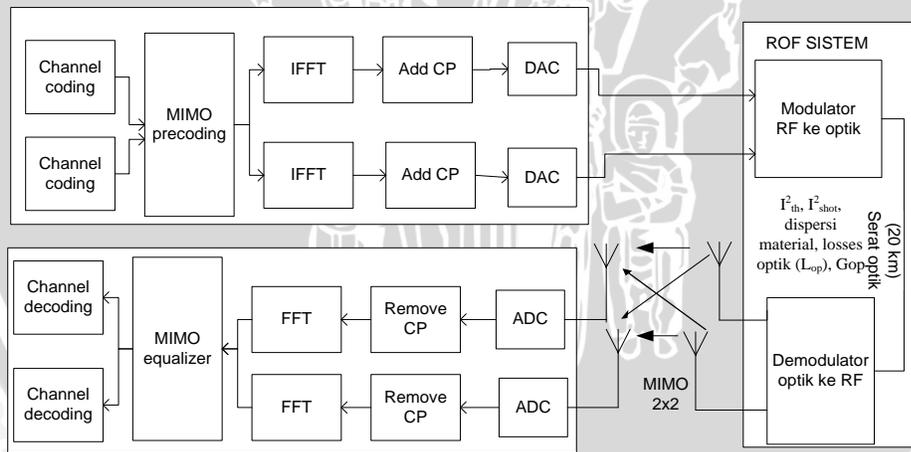
Kesimpulan merupakan ringkasan akhir dari pemecahan masalah. Pada tahapan ini dilakukan pengambilan kesimpulan berdasarkan teori, hasil perhitungan serta analisis mengenai pengaruh antena MIMO 2x2 terhadap performansi OFDMA pada Radio over Fiber jika dibandingkan dengan SIMO 1x2 dan SISO 1x1 untuk parameter SNR, Kapasitas Kanal, BER dan *Link Power Budget*.

Kemudian dilakukan juga pemberian saran yang dimaksudkan kepada pembaca yang akan melakukan studi lanjut tentang penelitian ini ataupun sebagai pendukung dari penelitiannya.

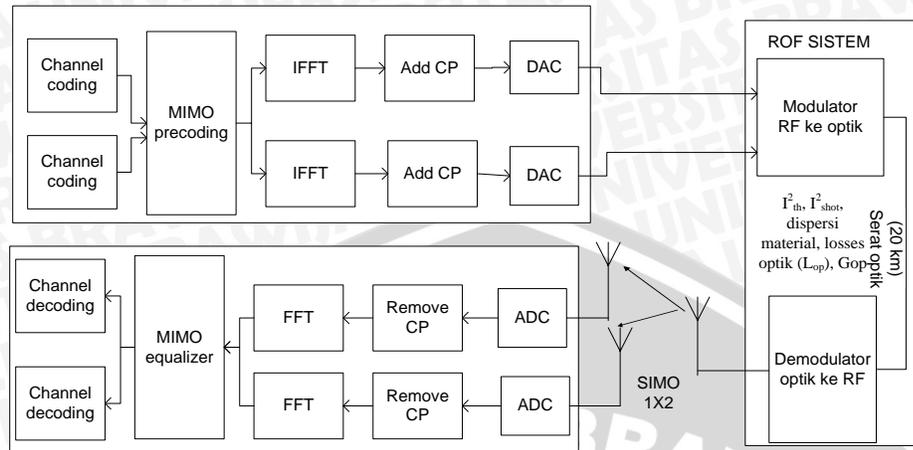
## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dibahas mengenai analisis dan pembahasan pengaruh antenna jamak MIMO 2x2 terhadap performansi OFDMA pada *Radio over Fiber* dengan sistem pembanding antenna jamak SIMO 1x2 dan SISO 1x1. Analisis yang akan dilakukan meliputi parameter *Signal to Noise Ratio* (SNR), Kapasitas kanal, *Bit Error Rate* (BER), dan *Link Power Budget*.

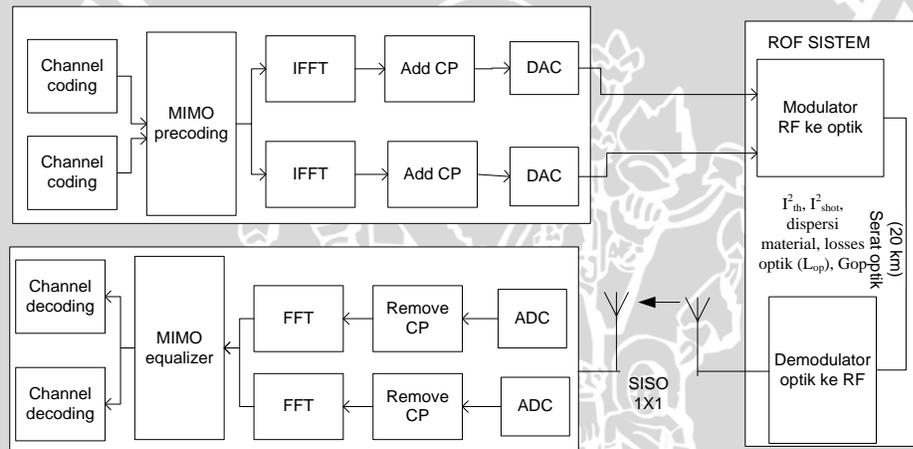
Parameter yang dilakukan untuk menganalisis performansi teknologi RoF dengan penerapan MIMO 2x2 pada OFDMA adalah menggunakan LTE *release 8* yang dikeluarkan oleh 3GPP. Untuk lebih memudahkan dalam menganalisis pengaruh penggunaan antenna MIMO 2x2, SIMO 1x2 dan SISO 1x1 terhadap performansi OFDMA pada teknologi *radio over fiber*, pemodelan yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 4.1a,b,c



**Gambar 4.1a** Pemodelan Sistem MIMO 2x2 - OFDMA pada teknologi RoF



Gambar 4.1b Pemodelan Sistem SIMO 1x2 - OFDMA pada teknologi RoF



Gambar 4.1c Pemodelan Sistem SISO 1x1 - OFDMA pada teknologi RoF

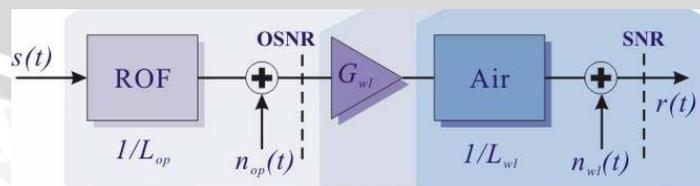
Kelebihan dari sistem pentransmisian menggunakan *multiple access* OFDMA adalah dapat menghemat penggunaan *bandwidth* dan mencegah terjadinya interferensi (ISI dan ICI) akibat penggunaan *cyclic prefix*. *Cyclic prefix* (CP) merupakan duplikat bagian akhir dari simbol OFDMA untuk menghilangkan *delay spread* yang terjadi antar data yang saling tumpang tindih. Berdasarkan aturan yang telah ditetapkan bahwa *delay spread* tidak boleh melebihi 10% dari panjang simbol OFDMA. Dengan demikian interval CP harus lebih besar atau sama dengan *delay spread* maksimum ( $T_{cp} \geq 2\tau$ ) agar orthogonalitas antar *subcarrier* tetap terjaga. Durasi *cyclic prefix* yang digunakan pada penelitian ini sebesar 6,51 %.

Penggunaan MIMO 2x2 pada OFDMA dengan teknologi RoF bertujuan untuk meningkatkan performansi sistem suatu jaringan dalam hal kapasitas kanal. Sistem antenna MIMO merupakan pengembangan dari teknologi antenna biasa yang menggunakan prinsip *Single Input Single Output* (SISO) menggunakan satu pemancar dan satu penerima. Sistem antenna MIMO menggunakan minimal dua antenna atau lebih di sisi penerima dan pemancarnya.

Pada penelitian ini digunakan skema *spatial multiplexing* untuk MIMO, prinsip kerjanya yaitu aliran data yang akan dikirim dipecah menjadi beberapa aliran paralel sesuai dengan jumlah  $M$  antenna pemancar yang kemudian diubah menjadi simbol-simbol sesuai teknik modulasi, dan ditransmisikan secara simultan dengan laju rata-rata  $1/M$  dari laju aliran data aslinya pada *bandwidth* yang sama untuk masing-masing antenna. Aliran-aliran data ini dilewatkan pada matriks khusus yang berfungsi menggabungkan sinyal dari semua aliran dengan kombinasi tertentu untuk dipancarkan melalui masing-masing antenna, sehingga dapat memberikan peningkatan kapasitas kanal sebanyak  $M$  kali.

#### 4.1 Analisis Pengaruh Penggunaan Antena Jamak MIMO 2x2, SIMO 1x2 dan SISO 1x1 terhadap Performansi OFDMA pada RoF untuk Parameter *Signal to Noise Ratio* (SNR)

*Signal to noise ratio* merupakan perbandingan antara daya sinyal yang diterima di sisi *user* dengan *noise* total yang dialami oleh sinyal. Untuk mengetahui perhitungan dari SNR ini dapat dianalisis dengan menggunakan pemodelan sistem seperti pada Gambar 4.2.



**Gambar 4.2** Pemodelan sistem, Perhitungan SNR

(Sumber: Xavier Fernando, 2004)

Pada gambar diatas dijelaskan bahwa, sinyal  $s(t)$  adalah sinyal RF yang dikirim oleh enodeB, dimana sinyal ini mengalami *losses* sebesar  $L_{op}$  dan  $n_{op}$ . sebelum dipancarkan sinyal dikuatkan sebesar  $G_{op}$  agar level daya yang dibutuhkan sesuai dengan level daya antena. Sinyal  $u(t)$  adalah sinyal yang dipancarkan antena ke *portable unit/UE*, dimana sinyal ini mengalami *losses* propagasi sebesar  $L_{wl}$  sehingga nilai SNR dapat diketahui, pada gambar dimodelkan dengan sinyal  $r(t)$  yang merupakan sinyal yang diterima di sisi *end user*. Jadi sinyal  $r(t)$  dapat ditulis dengan persamaan : (Fernando,Xavier.2004)

$$r(t) = C.s(t) + n(t) \quad (4.1)$$

Nilai  $C$  dan  $n(t)$  dinyatakan sebagai :

$$C = mI_D 10^{-L_{op}/10} \frac{G_{op}}{L_{wl}}$$

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

dengan :

- $m$  = indeks modulasi optik
- $I_D$  = arus yang terdeteksi oleh detektor
- $G_{op}$  = gain optik pada *radio access point*
- $L_{wl}$  = rugi-rugi *pathloss*
- $n_{op}$  = noise saluran optik, yang terdiri dari *thermal noise*, *shot noise*, dan *relative intensity noise (RIN)*

Sehingga rumus untuk SNR dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan :

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

$$SNR = \frac{m^2 I_D^2 10^{-L_{op}/10} P_{RFIn}}{E[n_{op}^2(t)]} \left[ \frac{1}{1 + \left(\frac{L_{wl}}{G_{op}}\right)^2} \right]$$

$$SNR = OSNR \left[ \frac{1}{1 + \left(\frac{L_{wl}}{G_{op}}\right)^2} \right] \quad (4.2)$$

Pada analisis perhitungan SNR digunakan spesifikasi dari LTE *release* 8 yang dikeluarkan oleh 3GPP dan spesifikasi dari teknologi *Radio over Fiber* yang disajikan pada table 4.1 dan 4.2 berikut :

**Tabel 4.1.** Spesifikasi LTE *release* 8

Parameter	Nilai
Frekuensi Operasi	2,6 GHz
<i>Bandwidth</i> kanal	10 MHz
Teknik modulasi	64-QAM
Tinggi antena enodeB	30 m
Tinggi antena UE	1,5 m
<i>Cyclic prefix</i>	6,51 %

(Sumber :Ergen, Mustafa.2009)

**Tabel 4.2** Spesifikasi Teknologi *Radio over Fiber*

Parameter	Nilai
Suhu Referensi (T)	300 K
<i>Rise time transmitter</i> ( $\Delta\tau_{source}$ )	16 psec
<i>Rise time receiver</i> ( $\Delta\tau_{receiver}$ )	25 psec
RIN ( <i>Relative Intensity Noise</i> )	-155 dB/Hz
<i>Spectral line width</i> ( $\Delta\lambda$ )	0,1 nm
Daya optik rata-rata( $P_0$ )	$0,2 \text{ W} \leq P_0 \leq 0,597 \text{ W}$
Indeks modulasi optik (m)	$0.1 \leq m \leq 0.9$
<i>Gain</i> optik ( $G_{op}$ )	50 dB
Responsivitas detektor ( $\mathfrak{R}$ )	0.75 mA/mW

(Sumber : Mohammed, et.al., Juli 2011)

**a. Perhitungan SNR di sisi nirkabel pada kanal AWGN**

Sebelum menghitung SNR sistem, diperlukan perhitungan *bandwidth* sistem pada sistem OFDMA, laju data yang tinggi akan dibagi kedalam beberapa *subcarrier* untuk kemudian dialirkan secara paralel dengan nilai laju data rendah. Untuk teknik modulasi 64-QAM, jumlah bit dalam 1 simbol adalah 6 bit dan laju data yang digunakan adalah 44,7 Mbps dengan jumlah *subcarrier* yaitu 1024 dengan kanal *bandwidth* 10 MHz, seperti pada Tabel 4.3.

**Tabel 4.3** Parameter Data Rate LTE pada Kanal 10 MHz

<b>Teknik Modulasi</b>	<b>Data Rate (Mbps) pada kanal 10 MHz</b>	<b>Coded Bits per Subcarrier</b>	<b>Jumlah Subcarrier pada kanal 10 MHz</b>
64-QAM	44,7	6	1024

(Sumber : H.Holma dan A.Toskala,2009)

Laju data masing-masing *subcarrier* untuk modulasi 64-QAM diperoleh dengan menggunakan persamaan (2.8) dengan parameter sesuai pada tabel 4.3, sebesar :

$$R_{sub} = \frac{R_{tot}}{N} = \frac{44,7}{1024} = 0,0437 \text{ Mbps}$$

Dengan jumlah kemungkinan sinyal untuk modulasi 64-QAM adalah  $2^6 = 64$  maka durasi simbol untuk masing-masing *subcarrier* dihitung dengan menggunakan persamaan (2.9), sebesar :

$$T_{sub} = \frac{\log_2 M}{R_{sub}} = \frac{\log_2 2^6}{0,0437 \text{ Mbps}} = 137,45 \mu s$$

Selain itu, pada perhitungan *bandwidth* sistem dibutuhkan *cyclic prefix* untuk mencegah terjadinya ISI dan ICI pada *subcarrier-subcarrier* yang saling tumpang tindih. Durasi CP yang digunakan sebesar 6,51% dari durasi *subcarrier*, sehingga:

$$T_{cp} = 0,0651 \times T_{sub}$$

$$T_{cp} = 0,0651 \times (137,45 \times 10^{-6}) = 8,948 \mu s$$

Sehingga durasi simbol OFDMA menjadi :

$$T_s = T_{sub} - T_{cp}$$

$$T_s = 137,45 \mu s - 8,948 \mu s = 128,5020 \mu s$$

Menggunakan persamaan (2.11) diperoleh *bandwidth* sistem OFDMA pada sisi *downlink* LTE dengan faktor *cyclic prefix* 6,51 % adalah

$$B_{sistem} = \frac{2}{T_s} + \frac{N-1}{(1-\alpha_{cp})T_s}$$

$$B_{sistem} = \frac{2}{128,5020 \times 10^{-6}} + \frac{1024-1}{(1-0,0651) \times 128,5020 \times 10^{-6}} = 8,5309 \text{ MHz}$$

Kanal *noise* yang digunakan untuk menghitung SNR pada kanal nirkabel terdiri dari redaman propagasi ruang bebas. Rugi-rugi propagasi ruang bebas dihitung dalam kondisi sistem bekerja pada frekuensi 2600 MHz dan tinggi antenna *transmitter* = 30 m, maka nilai redaman propagasi untuk jarak antara enodeB dan UE sepanjang 500 m dapat dihitung sebagai berikut :

$$L_{el} = A + 10\gamma \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + s + \Delta PL_f + \Delta PL_h$$

$$L_{el} = 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi f d}{c} \right) + 10 \left( a - bh_b + \frac{c}{h_b} \right) \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + s + 6 \log_{10} \left( \frac{f}{2000} \right) - 10,8 \log_{10} \frac{h}{2}$$

$$L_{el} = 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi \times 2600 \times 10^6 \times 500}{3 \times 10^8} \right) + 10 \left( 4 - 0,0065 \times 30 + \frac{17,1}{30} \right) \log_{10} \left( \frac{500}{100} \right) + 9,6 + 6 \log_{10} \left( \frac{2,6 \times 10^9}{2000} \right) - 10,8 \log_{10} \frac{1,5}{2} = 172,933 \text{ dB}$$

Dengan menggunakan cara perhitungan yang sama, dapat diperoleh besarnya redaman propagasi ruang bebas untuk jarak antara UE dan enodeB sejauh 500 m, 1000 m, 1500 m, 2000 m, 2500 m dan 3000 m. Hasil perhitungan tersebut ditunjukkan pada Tabel 4.4.

**Tabel 4.4.** Hasil Perhitungan Rugi-rugi Propagasi Ruang Bebas

Jarak antara pemancar dan penerima (m)	<i>Pathloss wireless</i> (dB)
500	172,933
1000	192,124
1500	203,350
2000	211,314
2500	217,492
3000	222,540

(Sumber : Perhitungan, 2013)

#### b. Perhitungan SNR pada kanal serat optik

Perhitungan SNR di sisi kabel yaitu ketika sinyal melewati media fisik serat optik yang dipengaruhi oleh rugi-rugi  $L_{op}$  dan  $n_{op}$ . Adapun perhitungannya rugi-rugi pada saluran serat optik ( $L_{op}$ ) berdasarkan persamaan (2.2) yaitu

$$L_{op} = 2(n_c l_c + n_s l_s + n_{sp} l_{sp} + \alpha(\lambda) l_f)$$

Pada penelitian ini digunakan panjang saluran serat optik sepanjang 20 km untuk menghubungkan antara BSC dan BS/RAU, jika diasumsikan untuk panjang tiap kabel tiap rol = 5 dengan koefisien redaman sambungan ( $l_s$ ) sebesar 0,5 dB maka jumlah sambungan yang dibutuhkan ditentukan dengan persamaan:

$$n_s = \frac{\text{panjang saluran}}{\text{panjang kabel tiap rol}} - 1 = \frac{20}{5} - 1 = 3 \text{ buah}$$

Jumlah konektor untuk saluran adalah 2, dengan koefisien rugi-rugi dari konektor ( $l_c$ ) sebesar 0,3 dB sesuai dengan spesifikasi pada lampiran II, *splitter* yang digunakan adalah 1x2 dengan koefisien redaman *splitter* = 3,9 sesuai spesifikasi pada lampiran III. Panjang gelombang yang digunakan pada penelitian ini adalah  $\lambda = 1550$  nm dan  $\lambda = 1310$  nm berdasarkan standar ITU-T G.652 pada lampiran I.

**Tabel 4.5** Spesifikasi Koefisien Redaman ( $\alpha$ )

Range (nm)	Referensi $\lambda$ (nm)	Koefisien Redaman (dB/km)
1285-1330	1310	0,03
1525-1575	1550	0,02

(Sumber : corning SMF 28)

Sehingga perhitungan rugi-rugi pada saluran optik ( $L_{op}$ ) untuk  $\lambda = 1550$  nm dan  $\lambda = 1310$  nm dengan panjang saluran optik 20 km adalah sebagai berikut :

$$L_{op(1550)} = 2(2 \times 0,3 + 3 \times 0,5 + 1 \times 3,9 + 0,02 \times 20) = 12,8 \text{ dB}$$

$$L_{op(1310)} = 2(2 \times 0,3 + 3 \times 0,5 + 1 \times 3,9 + 0,03 \times 20) = 13,2 \text{ dB}$$

**Tabel 4.6** Hasil Perhitungan Rugi-rugi Optik

Panjang Gelombang	Rugi-rugi optik ( $L_{op}$ )
1550 nm	12,8 dB
1310 nm	13,2 dB

(Sumber : Perhitungan, 2013)

Pada tabel 4.6 dapat dinyatakan bahwa nilai rugi-rugi optik ( $L_{op}$ ) pada saat menggunakan panjang gelombang 1550 nm memiliki nilai yang lebih kecil sebesar 12,8 dB dibandingkan dengan nilai rugi-rugi optik ( $L_{op}$ ) ketika menggunakan panjang gelombang 1310 nm sebesar 13,2 dB. Hal ini dikarenakan koefisien redaman untuk panjang gelombang 1550 nm lebih kecil daripada koefisien redaman untuk panjang gelombang 1310 nm seperti yang disajikan pada tabel 4.5.

Setelah mengetahui nilai dari rugi-rugi pada saluran optik, besarnya *noise* optik juga akan dihitung. Berdasarkan teori pada bab II dijelaskan bahwa *noise* pada saluran optik dipengaruhi oleh 3 jenis *noise* yaitu *shot noise*, *thermal noise*, dan *relative intensity noise* (RIN). Sebelum mencari ketiga *noise* tersebut, maka diperlukan perhitungan  $I_D$ , dimana  $I_D$  adalah arus yang terdeteksi oleh *receiver*/detektor optik yang besarnya ditentukan oleh daya masukan sinyal RF, daya laser rata-rata serta sensitivitas detektor, yaitu :

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

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

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

Dimana parameter nilai untuk  $P_0 = 0,597$  Watt,  $m = 0,1$ ,  $\Re = 0.75$  mA/mW, dan  $P_{RF,in} = 46$  dBm, sehingga :

$$I_D = 0,75 \left[ 1 + 0.1 \sqrt{2 \times \left( 10^{\frac{46}{10}} / 1000 \right)} \right] 0,597$$

$$I_D = 0,8473 \text{ A}$$

*Bandwidth* yang digunakan untuk analisis SNR adalah *bandwidth* sinyal RF yaitu *bandwidth* sistem OFDMA pada sisi *downlink* LTE release 8 sebesar 8,5309 MHz, sehingga nilai *shot noise* yaitu :

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

$$\langle I_{shot}^2 \rangle = 2 \times 1,6 \times 10^{-19} \times 0,8473 \times 8,5309 \times 10^6$$

$$\langle I_{shot}^2 \rangle = 2,3130 \times 10^{-12} (A^2)$$

*Thermal noise* merupakan rugi-rugi yang terjadi akibat panas di dalam saluran optik yang disebabkan oleh komponen resistif, sesuai dengan persamaan (2.4) maka besarnya *thermal noise* :

$$\langle I_{th}^2 \rangle = \frac{4 k T B}{R_L}$$

$$\langle I_{th}^2 \rangle = \frac{4 \times 1,38 \times 10^{-23} \times 300 \times 8,5309 \times 10^6}{50} = 2,8254 \times 10^{-15} \text{ (A}^2\text{)}$$

RIN merupakan rugi-rugi yang muncul akibat fluktuasi acak pada intensitas sinyal optik. Koefisien RIN yang dipakai pada penelitian ini sebesar RIN = -155 dB/Hz, sehingga nilainya dihitung melalui persamaan (2.1) yaitu :

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

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

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

$$\langle I_{RIN}^2 \rangle = \sqrt{3,1623 \times 10^{-16} \times 0,8473 \times 8,5309 \times 10^6}$$

$$\langle I_{RIN}^2 \rangle = 4,4007 \times 10^{-5} \text{ (A}^2\text{)}$$

Total *noise* dalam saluran optik adalah:

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

$$[n_{op}^2(t)] = 2,3130 \times 10^{-12} \text{ (A}^2\text{)} + 2,8254 \times 10^{-15} + 4,4007 \times 10^{-5}$$

$$[n_{op}^2(t)] = 4,4007 \times 10^{-5} \text{ A}^2$$

Setelah menghitung *noise* dan redaman yang mempengaruhi teknologi *Radio over Fiber* ini, perhitungan SNR dengan panjang saluran optik sepanjang 20 km dan jarak antara UE dan enodeB sejauh 500 m dapat ditentukan sesuai dengan persamaan (2.30) yaitu

$$OSNR = \frac{m^2 I_D^2 10^{-L_{op}/10} P_{RFin}}{E[n_{op}^2(t)]}$$

$$OSNR = \frac{(0,1)^2 (0,8473)^2 10^{-\frac{12,8}{10}} (10^{4,6} / 1000)}{4,4007 \times 10^{-5}} = 340,8239$$

$$OSNR = 10 \log_{10}(340,8239) = 25,3253 \text{ dB}$$

Sehingga nilai SNR sistem *radio over fiber* adalah sebagai berikut :

$$SNR = OSNR \left[ \frac{1}{1 + \left( \frac{L_{wl}}{G_{op}} \right)^2} \right]$$

$$SNR = 25,3253 \left[ \frac{1}{1 + \left( \frac{-172,933}{50} \right)^2} \right] = 26,293 \text{ dB}$$

Untuk nilai SNR = 26,293 dB = 398,19 serta durasi CP = 6,51 % dapat diperoleh nilai SNR sistem OFDMA sebagai berikut :

$$SNR_{OFDMA} = (1 - \alpha_{CP}) SNR$$

$$SNR_{OFDMA} = (1 - 0,0651) \times 392,19$$

$$SNR_{OFDMA} = 428,958 = 26,001 \text{ dB}$$

Perhitungan nilai SNR teknik antena jamak dilakukan dengan menggunakan persamaan 2.29 dan pada jarak 500 m menggunakan nilai SNR sistem OFDMA sebesar 26,001 dB. Variasi jumlah antena pada pemancar dan penerima (M x N) yaitu pada SISO 1x1, SIMO 1x2 dan MIMO 2x2. Sehingga nilai SNR untuk teknologi antena jamak dapat dihitung sebagai berikut :

$$\begin{aligned} SNR_{SISO} &= \frac{N^2 x P/M}{N_x N_o} = \frac{N_x P}{M x N_o} = \frac{N}{M} x SNR_{OFDMA} \\ &= \frac{1}{1} x 26,3241 = 26,001 \text{ dB} \end{aligned}$$

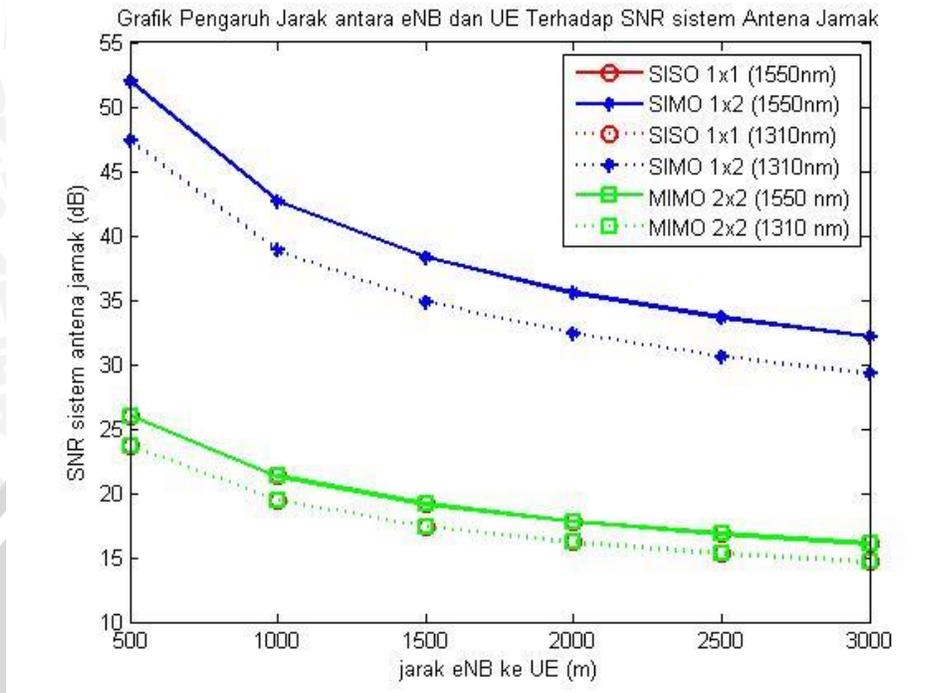
$$\begin{aligned}
 SNR_{SIMO} &= \frac{N^2 x P/M}{NxN_o} = \frac{NxP}{MxN_o} = \frac{N}{M} x SNR_{OFDMA} \\
 &= \frac{2}{1} x 26,3241 = 52,002 \text{ dB} \\
 SNR_{MIMO} &= \frac{N^2 x P/M}{NxN_o} = \frac{NxP}{MxN_o} = \frac{N}{M} x SNR_{OFDMA} \\
 &= \frac{2}{2} x 26,3241 = 26,001 \text{ dB}
 \end{aligned}$$

Dengan menggunakan cara perhitungan yang sama, dapat diperoleh nilai SNR sistem antenna jamak untuk panjang gelombang 1550 nm dan 1310 nm dengan variasi jarak UE dan eNB yaitu 1000 m, 1500 m, 2000 m, 2500 m, 3000 m. Hasil analisis disajikan pada tabel 4.7

**Tabel 4.7** Hasil Perhitungan SNR sistem Antena Jamak pada *Radio over Fiber*

Teknik antenna jamak	SISO 1x1		SIMO 1x2		MIMO 2x2	
	1550	1310	1550	1310	1550	1310
Panjang gelombang (nm)						
Jarak (m)	<i>Signal to noise ratio sistem (dB)</i>					
500	26,001	23,687	52,002	47,374	26,001	23,687
1000	21,327	19,424	42,654	38,849	21,327	19,424
1500	19,138	17,428	38,276	34,857	19,138	17,428
2000	17,777	16,187	35,554	32,374	17,777	16,187
2500	16,816	15,311	33,632	30,621	16,816	15,311
3000	16,085	14,644	32,172	29,289	16,085	14,644

(Sumber : Hasil perhitungan, 2013)



**Gambar 4.3** . Grafik Pengaruh Penggunaan Teknik Antena Jamak terhadap SNR Sistem pada Jarak yang Berbeda untuk Panjang Gelombang 1550 nm dan 1310 nm  
(Sumber: Hasil Perhitungan, 2013)

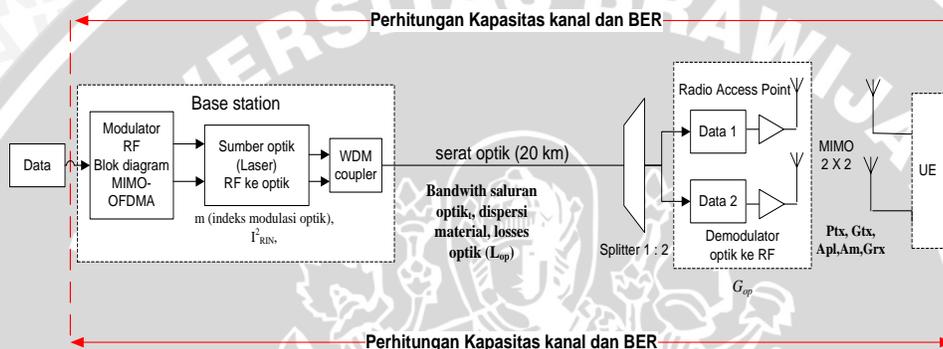
Berdasarkan hasil perhitungan *Signal to Noise Ratio* (SNR) sistem dengan penggunaan variasi antena MIMO 2x2, SIMO 1x2 dan SISO 1x1 dapat dianalisis bahwa:

1. Nilai SNR sistem dipengaruhi oleh jarak antara UE dan enodeB. Semakin jauh jarak antara UE dan enodeB maka nilai SNR sistem semakin kecil, hal ini dikarenakan semakin jauh jarak antara pemancar dan penerima maka rugi-rugi propagasi semakin besar dan peluang sinyal terinterferensi semakin tinggi. Saat penggunaan antena SISO 1x1, pada jarak antara UE dan enodeB 500 m nilai SNR sistem = 26,001 dB dan saat jarak antara UE dan enodeB 3000 m nilai SNR sistem = 16,085 dB. Saat penggunaan antena SIMO 1x2, pada jarak antara UE dan enodeB 500 m dihasilkan SNR sistem = 52,002 dB dan saat jarak antara UE dan enodeB 3000 m nilai SNR sistem = 32,172 dB dan pada penggunaan antena MIMO 2x2, pada jarak antara UE dan enodeB 500 m dihasilkan SNR sistem = 26,001 dB dan saat jarak antara UE dan enodeB 3000 m nilai SNR sistem = 16,085 dB

2. Pada jarak antara UE dan enodeB yang sama yaitu sejauh 500 m, ketika digunakan panjang gelombang 1550 nm nilai SNR sistem yang dihasilkan lebih besar daripada nilai SNR sistem untuk panjang gelombang 1310 nm. Hal ini berlaku pada semua jenis antena jamak yang digunakan. Pada penggunaan antena SISO 1x1, saat digunakan panjang gelombang 1550 nm nilai SNR sistem = 26,001 dan saat digunakan panjang gelombang 1310 nm nilai SNR sistem = 23,687 dB. Saat penggunaan antena SIMO 1x2, saat digunakan panjang gelombang 1550 nm nilai SNR sistem = 52,002 dan saat digunakan panjang gelombang 1310 nm nilai SNR sistem = 47,374 dB. Saat penggunaan antena MIMO 2x2, saat digunakan panjang gelombang 1550 nm nilai SNR sistem = 26,001 dan saat digunakan panjang gelombang 1310 nm nilai SNR sistem = 23,687 dB
3. Nilai SNR sistem yang paling besar penggunaan ketiga antena jamak saat jarak antara UE dan enodeB 500 m dan panjang gelombang yang digunakan 1550 nm, saat penggunaan antena SISO 1x1 dihasilkan SNR sebesar 26,001 dB, antena SIMO 1x2 dihasilkan SNR sebesar 52,002 dB dan antena MIMO 2x2 dihasilkan SNR sebesar 26,001 dB. Diantara ketiga antena jamak penggunaan SIMO 1x2 menghasilkan nilai SNR tertinggi dikarenakan memiliki 2 buah penerima sehingga daya sinyal yang masuk di tiap-tiap antena penerima dijumlahkan dan menghasilkan daya sinyal dua kali lipat dari daya sinyal yang dipancarkan oleh 1 buah antena pemancar. Sedangkan antena SISO 1x1 dan MIMO 2x2 menghasilkan SNR sistem yang nilainya sama karena jumlah antena pemancar dan penerima sama ( $M=N$ ) sehingga tidak menghasilkan kenaikan daya sinyal dari daya yang dipancarkan oleh antena pemancar.

### 4.2 Analisis Pengaruh Penggunaan Antena Jamak MIMO 2x2, SIMO 1x2 dan SISO 1x1 terhadap Performansi OFDMA pada RoF untuk Parameter Kapasitas Kanal

Kapasitas kanal sistem merupakan kemampuan saluran/kanal dalam mentransmisikan sejumlah data dalam satu detik yang dinyatakan dalam satuan bit persecond (bps). Perhitungan analisis kapasitas kanal sistem yang terdapat pada persamaan (2.33) berdasarkan teorema Shannon dan dapat dimodelkan sebagai berikut :



Gambar 4.4 Pemodelan Perhitungan Kapasitas Kanal Sistem

Untuk memperoleh besar nilai kapasitas kanal diperlukan nilai dari  $SNR_{sistem}$  dan *bandwidth* sistem optik,  $SNR_{sistem}$  yang digunakan adalah  $SNR_{sistem}$  antenna jamak yang telah disajikan pada tabel 4.7, serta *bandwidth* sistem pada saluran serat optik yang ditentukan pada persamaan (2.34), sehingga nilai *bandwidth* pada saluran serat optik untuk panjang serat optik 20 km dan panjang gelombang  $\lambda=1550$  nm dengan koefisien dispersi bahan sebesar 18 ps.nm/km adalah :

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

$$\Delta\tau_{mat} = 18 \times 0.1 \times 20 = 36 \text{ psec}$$

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

$$\Delta\tau_{sistem} = \sqrt{(16)^2 + (25)^2 + (36)^2} = 4,665 \times 10^{-11}$$

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

$$BW_{sig} = \frac{0.44}{4,665 \times 10^{-11} \times 20} = 471,51 \text{ MHz}$$

Untuk nilai *bandwidth* saluran serat optik dengan panjang serat optik 20 km dan panjang gelombang 1310 nm dengan koefisien dispersi bahan sebesar 14 ps.nm/km adalah :

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

$$\Delta\tau_{mat} = 14 \times 0.1 \times 20 = 28$$

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

$$\Delta\tau_{sistem} = \sqrt{(16)^2 + (25)^2 + (28)^2} = 4,080 \times 10^{-11}$$

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

$$BW_{sig} = \frac{0.44}{4,080 \times 10^{-11} \times 20} = 539,16 \text{ MHz}$$

Nilai *bandwidth* sistem pada saluran serat optik dengan panjang saluran serat optik sepanjang 20 km dan variasi panjang gelombang sebesar 1550 nm dan 1310 nm disajikan pada tabel 4.8 berikut

**Tabel 4.8** Hasil Perhitungan *Bandwidth* sistem Saluran Serat Optik

Panjang saluran serat optik (km)	<i>Bandwidth</i> (MHz)	
	$\lambda = 1550 \text{ nm}$	$\lambda = 1310 \text{ nm}$
20	471,51	539,16

(Sumber : Hasil perhitungan, 2013)

Pada tabel 4.8 didapatkan analisis bahwa *bandwidth* sistem pada panjang gelombang 1310 nm lebih besar dibandingkan dengan *bandwidth* sistem pada saat panjang gelombang 1510 nm. Hal ini dikarenakan, koefisien dispersi material pada panjang gelombang 1310 nm sebesar 14 ps.nm/km lebih kecil daripada koefisien dispersi material pada panjang gelombang 1550 nm sebesar 18 ps.nm/km sehingga dapat disimpulkan bahwa nilai koefisien dispersi material dari panjang gelombang yang digunakan sangat berpengaruh terhadap *bandwidth* sistem didalam saluran optik.

Setelah mengetahui nilai dari *bandwidth* sistem, maka kapasitas kanal sistem untuk panjang gelombang 1510 nm dengan jarak antara pemancar (enodeB) dan penerima (UE) sebesar 500 m serta  $SNR_{sistem} = 26,001$  dB adalah :

$$C = M \times BW_{sig} \log_2(1 + SNR_{sistem\ multi\ antenna})$$

$$\begin{aligned} C_{SISO} &= 1 \times 471,51 \log_2(1 + SNR_{SISO}) \\ &= 1 \times 471,51 \log_2(1 + 10^{26,001/10}) = 4,074 \text{ Gbps} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_{SIMO} &= 1 \times 471,51 \log_2(1 + SNR_{SIMO}) \\ &= 1 \times 471,51 \log_2(1 + 10^{52,002/10}) = 8,145 \text{ Gbps} \end{aligned}$$

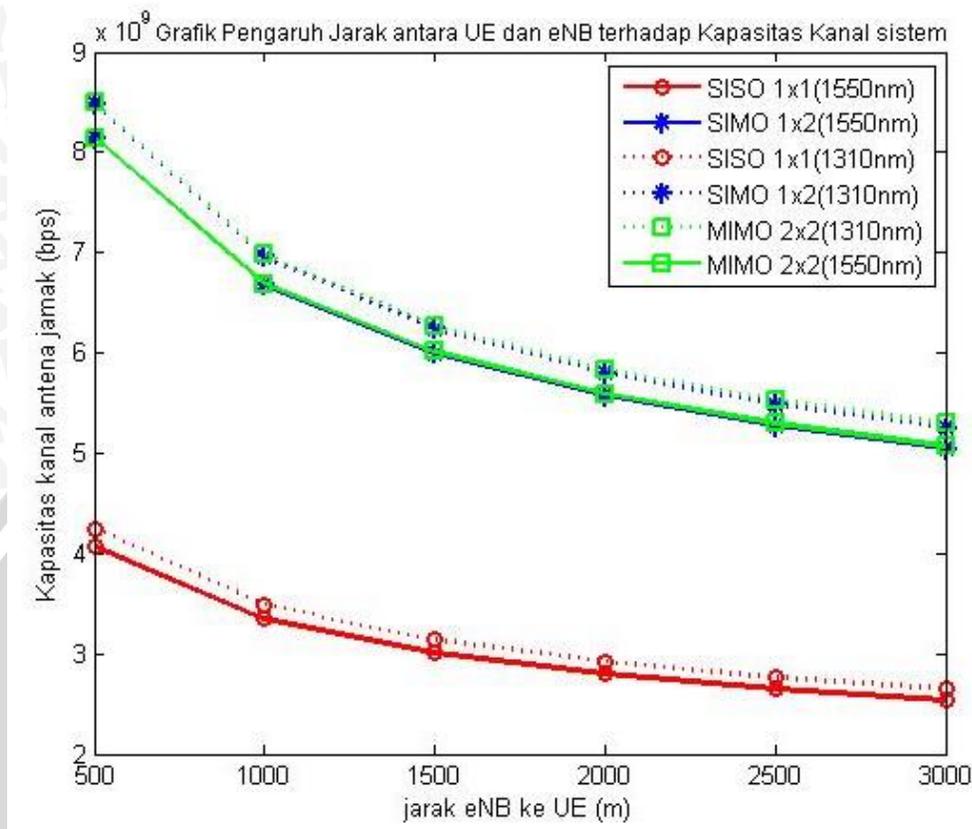
$$\begin{aligned} C_{MIMO} &= 2 \times 471,51 \log_2(1 + SNR_{MIMO}) \\ &= 2 \times 471,51 \log_2(1 + 10^{26,001/10}) = 8,149 \text{ Gbps} \end{aligned}$$

Dari perhitungan kapasitas kanal sistem ini juga didapatkan besarnya nilai kapasitas kanal sistem antena jamak MIMO 2x2, SIMO 1x2 dan SISO 1x1 dengan panjang gelombang 1310 nm dan variasi jarak antara pemancar dan penerima adalah 500 m, 1000 m, 1500 m, 2000 m, 2500 m dan 3000 m. Hasil perhitungan Kapasitas sistem antena jamak ditunjukkan pada tabel 4.9

**Tabel 4.9** Hasil Perhitungan Kapasitas Kanal Sistem Antena Jamak

Teknik antena jamak	SISO 1x1		SIMO 1x2		MIMO 2x2	
	1550	1310	1550	1310	1550	1310
Panjang gelombang (nm)	1550	1310	1550	1310	1550	1310
Jarak (m)	Kapasitas kanal sistem antena jamak (Gbps)					
500	4,074	4,245	8,145	8,485	8,149	8,492
1000	3,345	3,487	6,681	6,958	6,691	6,975
1500	3,006	3,135	5,995	6,243	6,011	6,271
2000	2,795	2,917	5,562	5,798	5,591	5,835
2500	2,648	2,764	5,268	5,485	5,296	5,529
3000	2,536	2,649	5,039	5,246	5,072	5,298

(Sumber : Hasil perhitungan, 2013)



**Gambar 4.5** Grafik Pengaruh Penggunaan Teknik Antena Jamak terhadap Kapasitas Kanal Sistem pada Jarak yang Berbeda untuk Panjang Gelombang 1550 nm dan 1310 nm (Sumber: Hasil Perhitungan, 2013)

Berdasarkan hasil perhitungan Kapasitas kanal sistem dengan penggunaan variasi antena MIMO 2x2, SIMO 1x2 dan SISO 1x1 dapat dianalisis bahwa:

1. Nilai kapasitas kanal sistem pada *radio over fiber* dipengaruhi oleh *bandwidth* sistem saluran serat optik. Semakin besar *bandwidth* sistem maka kapasitas kanal sistem juga semakin besar.
2. Pada tabel 4.9 ditunjukkan hasil perhitungan kapasitas kanal sistem pada teknik antena jamak dipengaruhi oleh jarak antara UE dan enodeB. Semakin jauh jarak antara UE dan enodeB maka nilai kapasitas kanal sistem semakin kecil, hal ini berlaku pada semua teknik antena jamak. Pada penggunaan panjang gelombang 1550 nm, saat penggunaan antena SISO 1x1 dengan jarak antara UE dan enodeB 500 m nilai kapasitas kanal sistem = 4,074 Gbps

dan saat jarak antara UE dan enodeB 3000 m nilai kapasitas kanal sistem = 2,536 Gbps. Saat penggunaan antenna SIMO 1x2 dengan jarak antara UE dan enodeB 500 m nilai kapasitas kanal sistem = 8,145 Gbps dan saat jarak antara UE dan enodeB 3000 m nilai kapasitas kanal sistem = 5,039 Gbps. Saat penggunaan antenna MIMO 2x2 dengan jarak antara UE dan enodeB 500 m nilai kapasitas kanal sistem = 8,149 Gbps dan saat jarak antara UE dan enodeB 3000 m nilai kapasitas kanal sistem = 5,072 Gbps.

3. Pada jarak antara UE dan enodeB yang sama yaitu 500 m, nilai kapasitas kanal sistem pada saat digunakan panjang gelombang 1550 nm lebih kecil daripada saat digunakan panjang gelombang 1310 nm. Sebagai contoh pada saat penggunaan antenna SISO 1x1 dengan panjang gelombang 1550 nm dihasilkan nilai kapasitas kanal sistem = 4,074 Gbps dan panjang gelombang 1310 dihasilkan nilai kapasitas kanal sistem = 4,245 Gbps. Saat penggunaan antenna SIMO 1x2 dengan panjang gelombang 1550 nm dihasilkan nilai kapasitas kanal sistem = 8,145 Gbps dan panjang gelombang 1310 dihasilkan nilai kapasitas kanal sistem = 8,485 Gbps. Saat penggunaan antenna SISO 1x1 dengan panjang gelombang 1550 nm dihasilkan nilai kapasitas kanal sistem = 8,149 dB Gbps dan panjang gelombang 1310 dihasilkan nilai kapasitas kanal sistem = 8,492 Gbps
4. Nilai kapasitas kanal sistem yang paling besar pada penggunaan ketiga antenna jamak, saat jarak antara UE dan enodeB 500 m dan panjang gelombang yang digunakan 1310 nm, penggunaan antenna SISO 1x1 nilai kapasitas kanal sistem sebesar 4,245 Gbps, antenna SIMO 1x2 nilai kapasitas kanal sistem sebesar 8,485 Gbps dan antenna MIMO 2x2 sebesar 8,492 Gbps. Dari ketiga antenna jamak yang digunakan, nilai kapasitas kanal sistem terbesar pada saat penggunaan antenna MIMO 2x2. Hal ini dikarenakan, dengan menggunakan 2 antenna pemancar maka akan mengakibatkan adanya efisiensi *bandwidth* dan meningkatkan kapasitas kanal sistem dibandingkan dengan menggunakan 1 antenna pemancar pada antenna SISO 1x1 dan SIMO 1x2.

### 4.3 Analisis Pengaruh Penggunaan Antena Jamak MIMO 2x2, SIMO 1x2 dan SISO 1x1 terhadap Performansi OFDMA pada RoF untuk Parameter *Bit Error Rate* (BER)

*Bit Error Rate* (BER) atau dengan sebutan lain probabilitas bit *error* merupakan perbandingan jumlah bit *error* terhadap total bit yang diterima di penerima. Perhitungan BER dipengaruhi oleh nilai  $E_b/N_0$  yaitu nilai perbandingan energi sinyal per bit terhadap *noise*. Perhitungan  $E_b/N_0$  dengan teknologi antena jamak, dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan (2.36) dengan *bandwidth* sistem sebesar 8,5360 MHz, laju data (R) sebesar 44,7 Mbps dan nilai SNR sistem yang disajikan pada tabel 4.7 dengan panjang gelombang sebesar 1550 nm sebagai berikut :

a. Antena SISO 1x1

$$\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{SISO} = SNR_{SISO} - 10 \log \frac{B_{sistem}}{R}$$

$$\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{SISO} = 26,001 - 10 \log \frac{8,5360 \times 10^6}{44,7 \times 10^6} = 18,807$$

b. Antena SIMO 1x2

$$\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{SIMO} = SNR_{SIMO} - 10 \log \frac{B_{sistem}}{R}$$

$$\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{SIMO} = 52,002 - 10 \log \frac{8,5360 \times 10^6}{44,7 \times 10^6} = 44,808$$

c. Antena MIMO 2x2

$$\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{MIMO} = SNR_{MIMO} - 10 \log \frac{B_{sistem}}{R}$$

$$\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{MIMO} = 26,001 - 10 \log \frac{8,5360 \times 10^6}{44,7 \times 10^6} = 18,807$$

Dari perhitungan  $E_b/N_0$  antena jamak tersebut ini juga didapatkan besarnya nilai  $E_b/N_0$  dengan panjang gelombang 1310 nm dan variasi jarak antara pemancar dan penerima adalah 500 m, 1000 m, 1500 m, 2000 m, 2500 m dan 3000 m. Hasil perhitungan  $E_b/N_0$  antena jamak ditunjukkan pada tabel 4.10

**Tabel 4.10** Hasil Perhitungan Eb/No Sistem Antena Jamak

Teknik antena jamak	SISO 1x1		SIMO 1x2		MIMO 2x2	
Panjang gelombang (nm)	1550	1310	1550	1310	1550	1310
Jarak (m)	Eb/No sistem antena jamak					
500	18,807	16,494	44,808	40,181	18,807	16,494
1000	14,134	12,231	35,461	31,656	14,134	12,231
1500	11,945	10,235	31,083	27,664	11,945	10,235
2000	10,584	8,994	28,361	25,181	10,584	8,994
2500	9,623	8,117	26,439	23,428	9,623	8,117
3000	8,892	7,451	24,978	22,096	8,892	7,451

(Sumber : Hasil perhitungan, 2013)

Pada tabel 4.10 dapat dinyatakan bahwa jarak antara UE dan enodeB mempengaruhi nilai Eb/No. nilai Eb/No semakin menurun saat jarak antara UE dan enodeB semakin jauh. Selain itu, nilai Eb/No juga dipengaruhi oleh panjang gelombang yang digunakan pada sistem, saat menggunakan panjang gelombang 1550 nm nilai dari Eb/No lebih besar dibanding saat menggunakan panjang gelombang 1310 nm. Nilai Eb/No tertinggi saat penggunaan antenna SIMO 1x2 seperti terlihat pada tabel.

Setelah menghitung Eb/No antenna jamak, maka besar nilai BER sistem multi antenna pada jarak 500 m dengan panjang gelombang 1550 nm dapat dihitung menggunakan persamaan (2.37) sebagai berikut :

a. Antena SISO 1x1

$$\begin{aligned}
 P_{be(SISO\ 1x1)} &= \frac{4(\sqrt{M_s}-1)}{\sqrt{M_s \log_2 M_s}} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{3 \log_2 M_s E_b}{4(M_s-1) N_o}} \right) \\
 &= \frac{4(\sqrt{64}-1)}{\sqrt{64 \log_2 64}} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{3 \log_2 64}{(64-1)} 18,807} \right) \\
 &= 0,5833 \operatorname{erfc}(2,1902)
 \end{aligned}$$

dimana,  $\operatorname{erfc} \approx \frac{1}{\sqrt{\pi x}} e^{-x^2}$

$$\operatorname{erfc} \approx \frac{1}{\sqrt{2,1902\pi}} e^{-(2,1902)^2} = 0,0031$$

maka,  $P_{be(SISO\ 1x1)} = 0,5833 \times 0,0031 = 0,0012$

b. Antena SIMO 1x2

$$P_{be(SIMO\ 1x2)} = \frac{4(\sqrt{M_s-1})}{\sqrt{M_s \log_2 M_s}} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{3 \log_2 M_s E_b}{4(M_s-1) N_o}} \right)$$

$$= \frac{4(\sqrt{64-1})}{\sqrt{64 \log_2 64}} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{3 \log_2 64}{(64-1)} 44,808} \right) = 6 \times 10^{-7}$$

c. Antena MIMO 2x2

$$P_{be(MIMO\ 2x2)} = \frac{4(\sqrt{M_s-1})}{\sqrt{M_s \log_2 M_s}} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{3 \log_2 M_s E_b}{4(M_s-1) N_o}} \right)$$

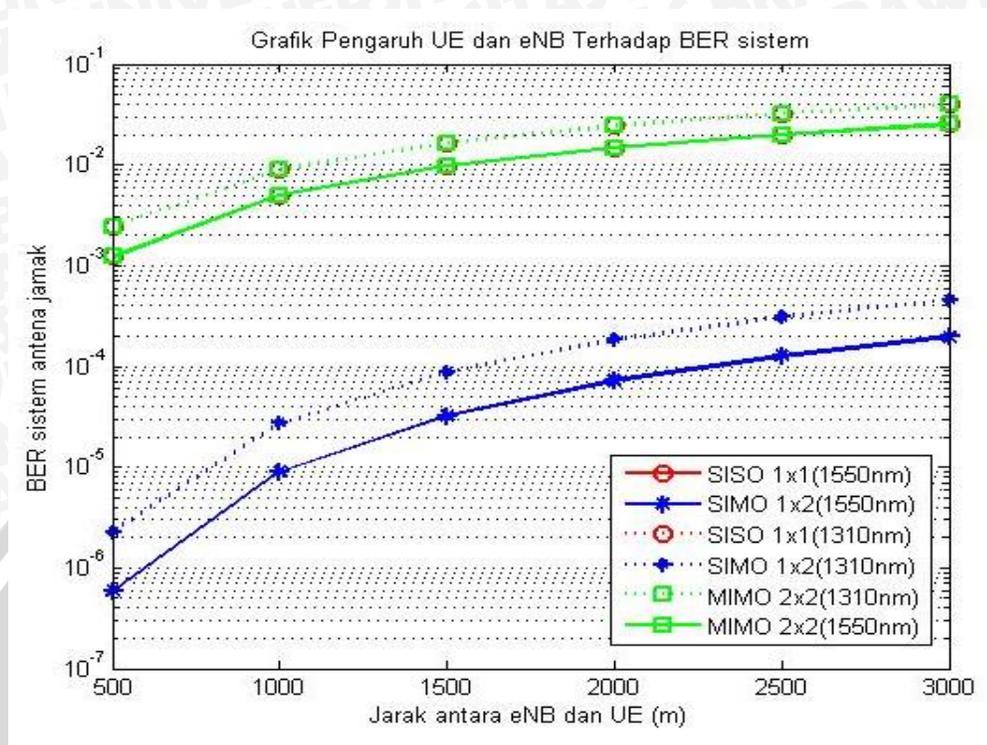
$$= \frac{4(\sqrt{64-1})}{\sqrt{64 \log_2 64}} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{3 \log_2 64}{(64-1)} 18,807} \right) = 0,0012$$

Dengan cara perhitungan yang sama diperoleh nilai BER antenna jamak dengan teknik modulasi 64-QAM serta nilai Eb/No sesuai tabel 4.9 pada panjang gelombang 1310 nm dan variasi jarak 500 m, 1000 m, 1500 m, 2000 m, 2500 m dan 3000 m, seperti pada tabel 4.11.

Tabel 4.11 Hasil Perhitungan *Bit Error Rate* (BER) sistem Antena Jamak

Teknik antenna jamak	SISO 1x1		SIMO 1x2		MIMO 2x2	
	1550	1310	1550	1310	1550	1310
Panjang gelombang (nm)						
Jarak (m)	<i>Bit Error Rate (BER) sistem antenna jamak</i>					
500	0,0012	0,0025	$6 \times 10^{-7}$	$2,3 \times 10^{-6}$	0,0012	0,0025
1000	0,0050	0,0090	$9 \times 10^{-6}$	$2,74 \times 10^{-5}$	0,0050	0,0090
1500	0,0098	0,0166	$3,24 \times 10^{-5}$	$8,88 \times 10^{-5}$	0,0098	0,0166
2000	0,0149	0,0244	$7,23 \times 10^{-5}$	$18,48 \times 10^{-5}$	0,0149	0,0244
2500	0,0200	0,0321	$12,74 \times 10^{-5}$	$31,04 \times 10^{-5}$	0,0200	0,0321
3000	0,0252	0,0397	$19,62 \times 10^{-5}$	$46,09 \times 10^{-5}$	0,0252	0,0397

(Sumber : Hasil perhitungan, 2013)



**Gambar 4.6** Grafik Pengaruh Penggunaan Teknik Antena Jamak terhadap *Bit Error Rate* (BER) Sistem pada Jarak yang Berbeda untuk Panjang Gelombang 1550 nm dan 1310 nm (Sumber: Hasil Perhitungan, 2013)

Berdasarkan hasil perhitungan *Bit Error Rate* (BER) sistem dengan penggunaan variasi antena MIMO 2x2, SIMO 1x2 dan SISO 1x1 dapat dianalisis bahwa bahwa:

1. Nilai BER sistem berbanding terbalik dengan SNR sistem, semakin besar nilai SNR sistem maka nilai BER akan semakin menurun. Selain itu, nilai BER juga dipengaruhi oleh jarak antara UE dan enodeB, semakin jauh jarak antara UE dan enodeB nilai BER akan semakin meningkat. Hal ini berlaku untuk semua penggunaan teknik antena jamak, saat penggunaan antena SISO 1x1 dengan jarak antara UE dan enodeB 500 m nilai BER sistem = 0,0012 dan saat jarak antara UE dan enodeB 3000 m nilai BER sistem = 0,0252. Saat penggunaan antena SIMO 1x2 dengan jarak antara UE dan enodeB 500 m nilai BER sistem =  $6 \times 10^{-7}$  dan saat jarak antara UE dan enodeB 3000 m nilai BER sistem =  $19,62 \times 10^{-5}$ . Saat penggunaan antena MIMO 2x2 dengan jarak

antara UE dan enodeB 500 m nilai BER sistem = 0,0012 dan saat jarak antara UE dan enodeB 3000 m nilai BER sistem = 0,0252

2. Nilai BER juga dipengaruhi oleh panjang gelombang yang digunakan pada sistem. Pada jarak yang sama saat digunakan panjang gelombang 1550 nm nilai BER sistem lebih kecil daripada ketika menggunakan panjang gelombang 1310 nm. Hal ini berlaku untuk semua penggunaan teknik antena jamak. Pada jarak antara UE dan enodeB 500 m, saat penggunaan antena SISO 1x1 dengan panjang gelombang 1550 nm dihasilkan BER sistem = 0,0012 dan panjang gelombang 1310 nm dihasilkan BER sistem = 0,0025. Saat penggunaan antena SIMO 1x2 dengan panjang gelombang 1550 nm dihasilkan BER sistem =  $6 \times 10^{-7}$  dan panjang gelombang 1310 nm dihasilkan BER sistem =  $2,3 \times 10^{-6}$ . Saat penggunaan antena MIMO 2x2 dengan panjang gelombang 1550 nm dihasilkan BER sistem = 0,0012 dan panjang gelombang 1310 nm dihasilkan BER sistem = 0,0025.
3. Sistem yang paling baik adalah sistem dengan nilai BER terendah dalam artian semakin kecil nilai BER maka terjadinya bit-bit yang salah dibanding dengan jumlah bit yang ditransmisikan kecil sekali. Pada penelitian ini, nilai BER terendah saat penggunaan SISO 1x1 dengan jarak 500 m dan panjang gelombang 1550 nm yaitu 0,0012. Nilai BER terendah saat penggunaan SIMO 1x2 dengan jarak 500 m dan panjang gelombang 1550 nm yaitu  $6 \times 10^{-7}$ . nilai BER terendah saat penggunaan MIMO 2x2 dengan jarak 500 m dan panjang gelombang 1550 nm yaitu 0,0012. Diantara ketiga antena jamak, penggunaan antena SIMO 1x2 menghasilkan nilai BER terkecil hal ini dikarenakan nilai SNR sistem yang dihasilkan SIMO 1x2 paling besar daripada SNR sistem saat digunakan antena SISO 1x1 dan MIMO 2x2 yang telah disajikan pada tabel 4.7.

#### 4.4 Analisis Pengaruh Penggunaan Antena Jamak MIMO 2x2, SIMO 1x2 dan SISO 1x1 terhadap Performansi OFDMA pada RoF untuk Parameter *Link Power Budget*

*Link Power Budget* adalah perhitungan terhadap kebutuhan daya dalam suatu saluran komunikasi baik komunikasi kabel maupun nirkabel yang harus dipenuhi agar didapatkan performansi sistem sebagaimana yang diinginkan. Pada penelitian ini dilakukan 2 tahapan perhitungan yaitu perhitungan *Link Power Budget* di sisi kabel dan nirkabel. Dalam melakukan perhitungan ini didasarkan dengan nilai datasheet yang dipakai oleh suatu perangkat yang digunakan, serta digunakan beberapa data sekunder mengenai parameter perhitungan *Link Power Budget* untuk LTE yang ditunjukkan pada tabel 4.12. Data sekunder yang diperlukan pada perhitungan ini diantaranya :

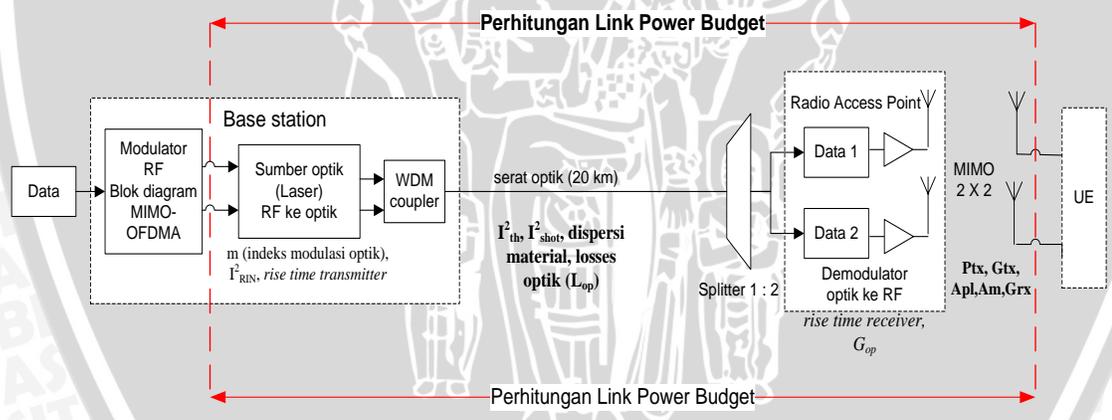
Tabel 4.12 Parameter *Link Power Budget*

No	Parameter <i>Link Budget</i>	Nilai
<b>Transmitter (Evolved Node B)</b>		
1	Tx Antenna Gain (Gt)	
	SISO 1x1 (Lamp.VII)	16 dBi
	MIMO 2x2 (Lamp.VI)	17 dBi
	SIMO 1x2	18 dBi
2	Cable Loss	2 dB
<b>Receiver (User Equipment)</b>		
3	UE Noise Figure (NF)	7 dB
4	Thermal Noise	-104,5 dB
5	Rx Antenna Gain (Gr)	
	SISO 1x1	0 dBi
	MIMO 2x2	0 dBi
	SIMO 1x2	0 dBi
6	Receiver sensitivity (dBm)	
	Downlink	-106,5 dBm
	Uplink	-123,4 dBm
7	Body Loss	0 dB

**Tabel 4.13** Parameter *Power Link Budget* Optik

Parameter	Nilai Redaman
Panjang gelombang (Lamp.I)	
$\lambda = 1550 \text{ nm}$	$\alpha (L_f) = 0,02 \text{ dB/km}$
$\lambda = 1310 \text{ nm}$	$\alpha (L_f) = 0,03 \text{ dB/km}$
Rugi Sambungan ( $l_s$ )	0,5 dB
Rugi Konektor ( $l_c$ ) (Lamp.II)	0,3 dB
Rugi <i>splitter</i> 1x2 (Lamp.III)	3,9 dB
Rugi WDM coupler (Lamp.V)	0,7 dB
Daya input optik ( $P_{tx}$ ) (Lamp.IV)	0,5 dBm
<i>Safety margin</i> (SM)	6 dB
Panjang saluran optik ( $L_f$ )	20 km

Perancangan sistem jaringan dapat dilihat pada gambar 4.9 :



**Gambar 4.7.** Pemodelan Perhitungan *Link Power Budget* Sistem

- Perhitungan Power Budget

$$P_{tx} - P_{rx} = a_{total} + SM$$

$$P_{rx} = P_{tx} - a_{total} - SM$$

- Perhitungan Redaman total pada saluran optik dengan  $\lambda=1550$  nm dan  $\lambda=1310$  nm adalah :

$$\begin{aligned} a_{total (1550 \text{ nm})} &= (a_f L_f) + (n_s l_s) + (n_c l_c) + (n_{sp} l_{sp}) + (L_{coupler}) \\ &= (0,02 \times 20) + (3 \times 0,5) + (2 \times 0,3) + (1 \times 3,9) + (1 \times 0,7) \\ &= 7,1 \text{ dB} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_{total (1310 \text{ nm})} &= (a_f L_f) + (n_s l_s) + (n_c l_c) + (n_{sp} l_{sp}) + (L_{coupler}) \\ &= (0,03 \times 20) + (3 \times 0,5) + (2 \times 0,3) + (1 \times 3,9) + (1 \times 0,7) \\ &= 7,3 \text{ dB} \end{aligned}$$

Ketika merancang sebuah link serat optik, perlu diperhatikan juga umur dari perangkat elektro-optik dari pemancar dan penerima serta pengaruh suhu pada perangkat elektronik dan elektro-optik. Oleh karena itu, diperlukan kompensasi daya untuk menanggulangi terjadinya degradasi sistem pada jaringan serat optik, maka pada penelitian ini digunakan nilai *safety margin* (SM) sebesar 6 dB, sehingga didapat daya pada penerima optik sebesar :

$$\begin{aligned} P_{rx} &= P_{tx} - a_{total} - SM \\ P_{rx} &= 0,5 \text{ dBm} - 7,1 \text{ dB} - 6 \text{ dB} \\ P_{rx} &= 0,5 \text{ dBm} - 10,7 \text{ dB} - 6 \text{ dB} \\ P_{rx} &= -12,6 \text{ dBm} \end{aligned}$$

Dari perhitungan didapat nilai sebesar  $P_{rx} = -12,6$  dBm, hal ini berarti penerima optik harus memberikan sensitifitas yang lebih besar dari -12,6 dBm. Setelah menghitung *link power budget* pada saluran serat optik, selanjutnya dilakukan perhitungan pada saluran nirkabel sesuai persamaan (2.41) dengan parameter sesuai dengan tabel 4.15.

Nilai dari besarnya redaman propagasi ruang bebas ( $A_{pl}$ ) dengan variasi jarak antara 500 m – 3000 m sesuai dengan tabel 4.4. selain redaman propagasi ruang bebas, redaman pada sisi nirkabel ini dipengaruhi oleh *loss* yang ada di pemancar dan penerima, sehingga didapat rugi-rugi tambahan :

$$A_m = \text{cable loss} + \text{Noise figure} + \text{Body Loss} + \text{Thermal noise}$$

$$A_m = 2 + 7 + 0 + (-104.5) = -95.5 \text{ dB}$$

Setelah menghitung rugi-rugi propagasi di ruang bebas, maka daya pada sisi *end user* dengan jarak antara UE dan eNB 500 m dan panjang gelombang 1550 nm sebagai berikut :

- a. Daya yang diterima pada penggunaan antenna SISO 1x1

$$P_{rx} = P_{tx} + G_{tx} - A_{pl} + G_{rx} - A_m$$

$$P_{rx} = -12,6 + 16 - 172,934 + 0 - (-95,5) = -74,034 \text{ dBm}$$

- b. Daya yang diterima pada penggunaan antenna SIMO 1x2

$$P_{rx} = P_{tx} + G_{tx} - A_{pl} + G_{rx} - A_m$$

$$P_{rx} = -12,6 + 0 - 172,934 + 18 - (-95,5) = -72,034 \text{ dBm}$$

- c. Daya yang diterima pada penggunaan antenna MIMO 2x2

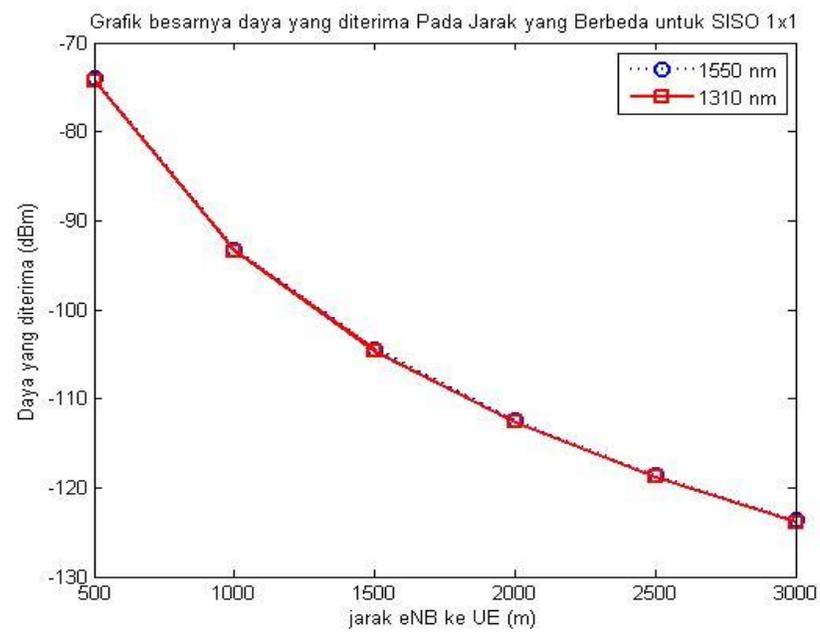
$$P_{rx} = P_{tx} + G_{tx} - A_{pl} + G_{rx} - A_m$$

$$P_{rx} = -12,6 + 17 - 172,934 + 0 - (-95,5) = -73,034 \text{ dBm}$$

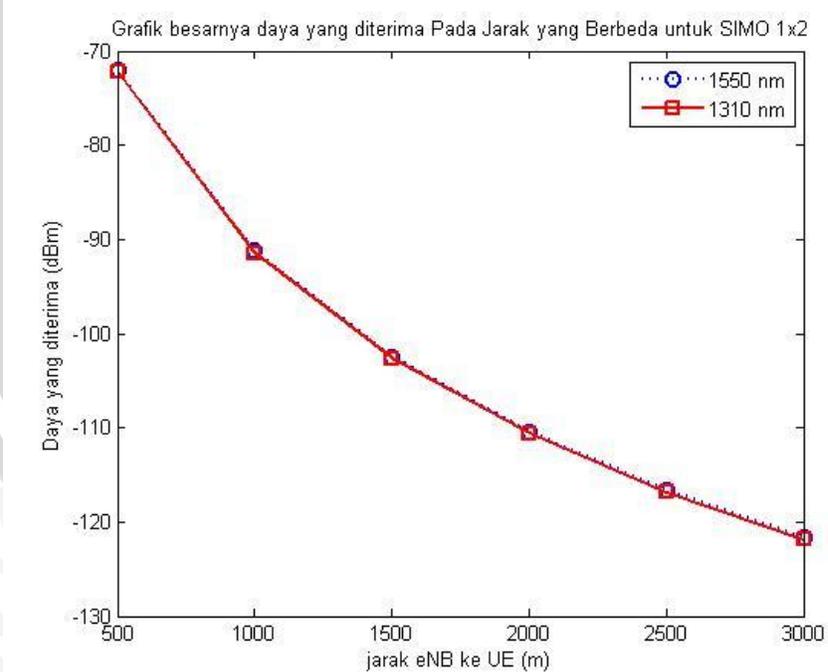
Tabel 4.14 Hasil Perhitungan *Link Power Budget* sistem Antena Jamak

Teknik antena jamak	SISO 1x1		SIMO 1x2		MIMO 2x2	
	1550	1310	1550	1310	1550	1310
Panjang gelombang (nm)						
Jarak (m)	Daya Terima di <i>end user</i> (dBm)					
500	-74,034	-74,234	-72,034	-72,234	-73,034	-72,234
1000	-93,224	-93,424	-91,224	-91,424	-92,224	-92,424
1500	-104,45	-104,65	-102,45	-102,65	-103,45	-103,65
2000	-112,42	-112,62	-110,42	-110,62	-111,42	-111,62
2500	-118,59	-118,79	-116,59	-116,79	-117,59	-117,79
3000	-123,64	-123,84	-121,64	-121,84	-122,64	-122,84

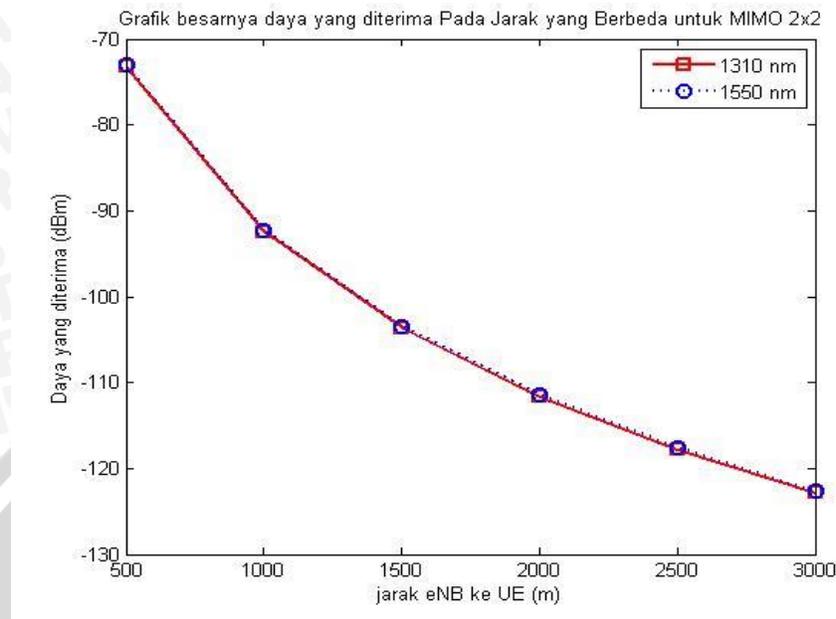
(Sumber : Hasil perhitungan, 2013)



**Gambar 4.8a** Grafik Pengaruh Penggunaan Teknik Antena SISO 1x1 terhadap Daya yang Diterima pada Jarak yang Berbeda untuk Panjang Gelombang 1310 nm dan 1550 nm dengan Gain antenna pemancar 16 dBi (Sumber: Hasil Perhitungan, 2013)



**Gambar 4.8b** Grafik Pengaruh Penggunaan Teknik Antena SIMO 1x2 terhadap Daya yang Diterima pada Jarak yang Berbeda untuk Panjang Gelombang 1310 nm dan 1550 nm dengan Gain antenna pemancar 18 dBi (Sumber: Hasil Perhitungan, 2013)



**Gambar 4.8c** Grafik Pengaruh Penggunaan Teknik Antena MIMO 2x2 terhadap Daya yang Diterima pada Jarak yang Berbeda untuk Panjang Gelombang 1310 nm dan 1550 nm dengan *Gain* antena pemancar 17 dBi (Sumber: Hasil Perhitungan, 2013)

Berdasarkan hasil perhitungan *Link Power Budget* sistem dengan penggunaan variasi antena MIMO 2x2, SIMO 1x2 dan SISO 1x1 dapat dianalisis bahwa bahwa:

1. Nilai *Link Power Budget* dipengaruhi oleh jarak antara UE dan enodeB, pada teknik penggunaan antena jamak yang sama semakin jauh jarak antara UE dan enodeB maka daya yang diterima pada sisi UE semakin kecil. Hal ini berlaku untuk semua penggunaan teknik antena jamak. Pada panjang gelombang 1550 nm, saat penggunaan SISO 1x1 untuk jarak antara UE dan enodeB 500 m daya yang diterima = -74,034 dBm dan untuk jarak antara UE dan enodeB 3000 m daya yang diterima = -123,64 dBm. Saat penggunaan SISO 1x1 untuk jarak antara UE dan enodeB 500 m daya yang diterima = -74,034 dBm dan untuk jarak antara UE dan enodeB 3000 m daya yang diterima = -123,64 dBm. Saat penggunaan SIMO 1x2 untuk jarak antara UE dan enodeB 500 m daya yang diterima = -72,034 dBm dan untuk jarak antara UE dan enodeB 3000 m daya yang diterima = -121,64 dBm. Saat penggunaan MIMO 2x2 untuk jarak antara UE dan enodeB 500 m daya yang

- diterima =  $-73,034$  dBm dan untuk jarak antara UE dan enodeB 3000 m daya yang diterima =  $-122,64$  dBm
2. Nilai *Link Power Budget* juga dipengaruhi oleh panjang gelombang yang digunakan pada sistem. Pada jarak eNB dan UE yang sama, saat digunakan panjang gelombang 1550 nm daya yang diterima lebih besar daripada ketika menggunakan panjang gelombang 1310 nm dikarenakan rugi-rugi saluran optik  $1550 \text{ nm} < \text{rugi-rugi saluran optik } 1310 \text{ nm}$ . Hal ini berlaku untuk semua penggunaan teknik antena jamak. Pada jarak antara UE dan enodeB 500 m, saat penggunaan antena SISO 1x1 dengan panjang gelombang 1550 nm daya yang diterima =  $-74,034$  dBm dan panjang gelombang 1310 nm daya yang diterima =  $-74,234$  dBm. Saat penggunaan antena SIMO 1x2 dengan panjang gelombang 1550 nm daya yang diterima =  $-72,034$  dBm dan panjang gelombang 1310 nm daya yang diterima =  $-72,234$  dBm. saat penggunaan antena MIMO 2x2 dengan panjang gelombang 1550 nm daya yang diterima =  $-73,034$  dBm dan panjang gelombang 1310 nm daya yang diterima =  $-72,234$  dBm
  3. Daya yang diterima di sisi penerima juga dipengaruhi oleh gain antena pemancar ( $G_{tx}$ ). Semakin besar gain antena maka daya yang diterima di sisi penerima juga semakin tinggi. Hal ini terlihat pada tabel 4.14 saat pemakaian antena SIMO 1x2 menghasilkan daya penerima yang paling tinggi dikarenakan *gain* antena pemancar sebesar 18 dBi. Sedangkan daya yang diterima saat menggunakan antena SISO 1x1 menghasilkan daya terendah yang diterima di penerima dikarenakan *gain* antena pemancar hanya sebesar 16 dBi.

## BAB V

### PENUTUP

#### 5.1 Kesimpulan

Dari analisis perhitungan pengaruh MIMO 2x2, SIMO 1x2 dan SISO 1x1 terhadap performansi OFDMA pada teknologi *radio over fiber* pada LTE release 8 yang telah dilakukan dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Berdasarkan analisis perhitungan SNR sistem MIMO 2x2, SIMO 1x2 dan SISO 1x1 dapat disimpulkan bahwa :
  - a. Nilai SNR sistem dipengaruhi oleh jarak antara UE dan eNB, semakin jauh jarak antara UE dan eNB maka nilai SNR akan semakin kecil
  - b. Nilai SNR sistem saat menggunakan panjang gelombang 1550 nm lebih besar daripada saat menggunakan panjang gelombang 1310 nm
  - c. Nilai SNR sistem tertinggi antena jamak saat jarak antara UE dan enodeB 500 m dan panjang gelombang 1550 nm, untuk penggunaan antena SISO 1x1 sebesar 26,001 dB, SIMO 1x2 sebesar 52,002 dB dan MIMO 2x2 sebesar 26,001 dB.
2. Berdasarkan analisis perhitungan Kapasitas kanal sistem MIMO 2x2, SIMO 1x2 dan SISO 1x1 dapat disimpulkan bahwa :
  - a. Nilai Kapasitas kanal mengalami penurunan seiring dengan semakin jauhnya jarak antara UE dan eNB,
  - b. Pada jarak UE dan eNB yang sama, Nilai Kapasitas kanal saat menggunakan panjang gelombang 1550 nm nilai kapasitas kanal sistem lebih kecil daripada saat menggunakan panjang gelombang 1310 nm. Hal ini dikarenakan *bandwidth* sistem pada saluran optik ketika menggunakan panjang gelombang 1310 nm lebih besar yaitu 539,16 MHz daripada ketika menggunakan panjang gelombang 1550 nm yaitu 471,51 MHz.
  - c. Nilai kapasitas kanal sistem tertinggi antena jamak saat jarak antara UE dan enodeB 500 m dan panjang gelombang 1310 nm, untuk penggunaan

antena SISO 1x1 yaitu 4,245 Gbps, SIMO 1x2 yaitu 8,485 Gbps dan MIMO 2x2 yaitu 8,492 Gbps

3. Berdasarkan analisis perhitungan *Bit Error Rate* (BER) sistem MIMO 2x2, SIMO 1x2 dan SISO 1x1 dapat disimpulkan bahwa :
  - a. BER sistem berbanding terbalik dengan SNR sistem, Nilai BER sistem mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya jarak antara UE dan enodeB.
  - b. Pada jarak antara UE dan eNB yang sama, Nilai BER saat menggunakan panjang gelombang 1550 nm nilai BER sistem lebih kecil daripada saat menggunakan panjang gelombang 1310 nm.
  - c. Nilai BER sistem tertinggi antena jamak saat jarak antara UE dan enodeB 500 m dan panjang gelombang 1550 nm, untuk penggunaan antena SISO 1x1 yaitu 0,0012, SIMO 1x2 yaitu  $6 \times 10^{-7}$  dan MIMO 2x2 yaitu 0,0012.
4. Berdasarkan analisis perhitungan *Link Power Budget* MIMO 2x2, SIMO 1x2 dan SISO 1x1 dapat disimpulkan bahwa :
  - a. Daya yang diterima pada *end users* semakin kecil seiring dengan bertambahnya jarak antara UE dan enodeB.
  - b. Perhitungan *Link Power Budget* juga dipengaruhi oleh panjang gelombang, saat menggunakan panjang gelombang 1550 nm daya yang diterima pada *end users* semakin besar daripada saat menggunakan panjang gelombang 1310 nm. Hal ini dikarenakan redaman total ( $\alpha_{total}$ ) saat 1550 nm = 7,1 dB lebih besar dari redaman total ( $\alpha_{total}$ ) saat 1310 nm = 7,3 dB
5. Pada saat penggunaan antena SIMO 1x2 menghasilkan nilai SNR sistem dan BER sistem dengan performa terbaik, hal ini dikarenakan adanya penambahan antena penerima yang jumlahnya lebih besar dari antena pemancar ( $M > N$ ), sehingga dapat dikatakan nilai SNR dan BER sistem berbanding lurus dengan jumlah antena penerima. Sebaliknya, antena MIMO 2x2 menghasilkan nilai kapasitas kanal sistem terbesar, hal ini dikarenakan jumlah antena pemancar lebih besar daripada jumlah antena pemancar SISO 1x1 dan SIMO 1x2, sehingga dapat dikatakan kapasitas kanal sistem berbanding lurus dengan

jumlah antena pemancar. Oleh karena itu, antena MIMO 2x2 yang paling optimal diimplementasikan pada OFDMA dengan teknologi *radio over fiber* karena memiliki kapasitas kanal yang tinggi sehingga dapat mengakomodasi layanan dengan *bandwidth* yang tinggi dan kapasitas yang besar pada jaringan LTE release 8

## 5.2 Saran

Saran yang diberikan berdasarkan analisis yang telah dilakukan pada penelitian ini adalah:

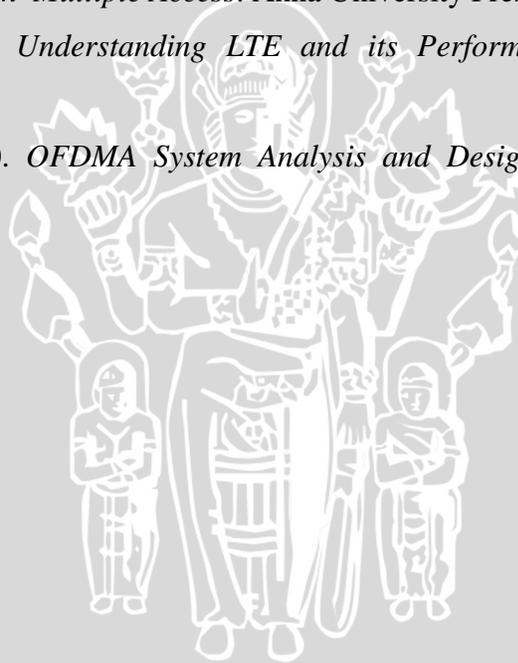
1. Menganalisis performansi penggunaan MIMO-OFDMA pada jaringan LTE release 8 dengan teknologi *radio over fiber* untuk jumlah antena yang lebih banyak, misalnya MIMO 2x4 dan MIMO 4x4
2. Mensimulasikan penggunaan teknik antena jamak SISO 1x1, SIMO 1x2 dan MIMO 2x2 pada OFDMA yang diterapkan pada teknologi *radio over fiber* pada LTE release 8 sehingga dapat diketahui perbandingan dari hasil perhitungan dan simulasi.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abd El-Naser A. Mohamed, 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
- Alamouti, Stavash M. 1998. *A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communication*. IEEE Journal on Select Area In Communication Othman, M.B. 2011.
- Al-Raweshidy,Hamed. 2010.*Optical Fiber Technologies and Radio over Fiber Strategic Research for Future Network*. London, Brunel University : eMobility Technology Platform
- Chang, S.William. 2002. *RF Photonic Technology in Optical Fiber Links*. University of California, San Diego : University Press Cambridge
- Chen, Kwang-Cheng, J. Roberto B. De Marca. 2008. *Mobile WiMAX*. London : John Wiley & Sons, Inc.
- Ergen, Mustafa. 2009. *Mobile broadband including WiMAX and LTE*. United States : Springer.
- Febrizal. 2009. Evaluasi Kinerja Sistem OFDM Radio over Fiber (OFDM-RoF). Universitas Riau, Pekanbaru : Jurnal Sains dan Teknologi
- Fernando, Xavier dan Anpalagan, Alagan. 2004. *On The Design of Optical Fiber Based Wireless Access System*. Ryerson University, Canada : IEEE Communications Society
- Fernando, Xavier. 2006. *Radio over Fiber in Multimedia Access Network*. Ryerson University, Canada : IEEE Communications Society
- Fernando, Xavier. 2009. *Radio over Fiber An Optical Technique for Wireless Access*. Ryerson University, Canada : IEEE Communications Society
- Forouzan, Behrouz A. 2000. *Data Communications and Networking 2<sup>nd</sup> edition*. Mc Graw-Hill International Edition.

- Hamed Al-Raweshidy and Shozo Komaki. 2002. *Radio Over Fiber Technologies For Mobile Communication Network*. 1st edition. Universal Personal Communication, Norwood, MA: Artech House Publishers.
- Hara, Shisuke, Ramjee Prasaad. 2003. *Multicarrier Technique for 4G mobile communications*. London : Artech House.
- Harjula, Ilkka et al. 2008. *Practical Issues in the Combining of MIMO Technique and RoF in OFDM/A Systems*. UK : WSEAS Int.Conf on Electronics, Hardware, Wireless and Optical Communication Cambridge
- Holma, Harri, Antti Toskala. 2009. *LTE for UMTS - OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access Ebook*. New York : John Wiley & Sons, Inc.
- K. Fazel, S. Kaiser. 2008. *Multicarrier and Spread Spectrum Systems*. New York : John Wiley & Sons, Inc.
- Khan,Farouq. 2009. *LTE for 4G Mobile Broadband*. New York : John Wiley & Sons,Inc.
- Kumar, Amitabh. 2008. *Mobile Broadcasting with WiMAX :Principles, Technology, and Applications*. Oxford : Elsevier Inc.
- Lawrey, E.P. 2001. *Adaptive Techniques for Multiuser OFDM*, Ph.D. thesis, Dept. Elect. Eng., James Cook University., Australia
- Lin, Chun-Ting,et al. 2011. *2x2 MIMO radio-over-fiber system at 60 GHz employing frequency domain equalization*. 22 Desember 2011/Vol.20, No.1/Optics Express 562
- 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.
- Mohd. Razali, Siti Harliza. 2007. *Simulation of WCDMA Radio Over Fiber Technology*. Universiti Teknologi Malaysia. Thesis.
- Ng'oma, A. (2002). *“Design of a radio-over-fiber system for wireless LANs”*, Technische Universiteit Eindhoven
- Optics,Inc. 2010. *Defining Optical Modulation Index*. M2 Optics Inc.

- Prasad, Ramjee. 2004. *OFDM for wireless communications systems*. London : Artech House.
- Raghavendra,M.V et al.2010. Estimation of Optical Link Length for Multi Haul Applications. IJEST Vol. 2(6),1485-1491
- Rakhmania, Amalia Eka. 2012. *Performansi Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) PADA Teknologi Radio over Fiber (RoF)*. Skripsi tidak dipublikasikan. Malang: Universitas Brawijaya
- Restantia,Fidela. 2011. *Performansi MIMO OFDMA pada LTE*. Skripsi tidak dipublikasikan. Malang : Universitas Brawijaya
- Srikanth, Kumaran V., Manikandan C., Murugesapandian. 2007. *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*. Anna University Press, Chennai, India.
- Ali-Yahiya,Tara. 2011. *Understanding LTE and its Performance*. New York : Springer
- Yang, Samuel C. 2010. *OFDMA System Analysis and Design*. Boston,London : Artech House





# LAMPIRAN

# LAMPIRAN 1

---

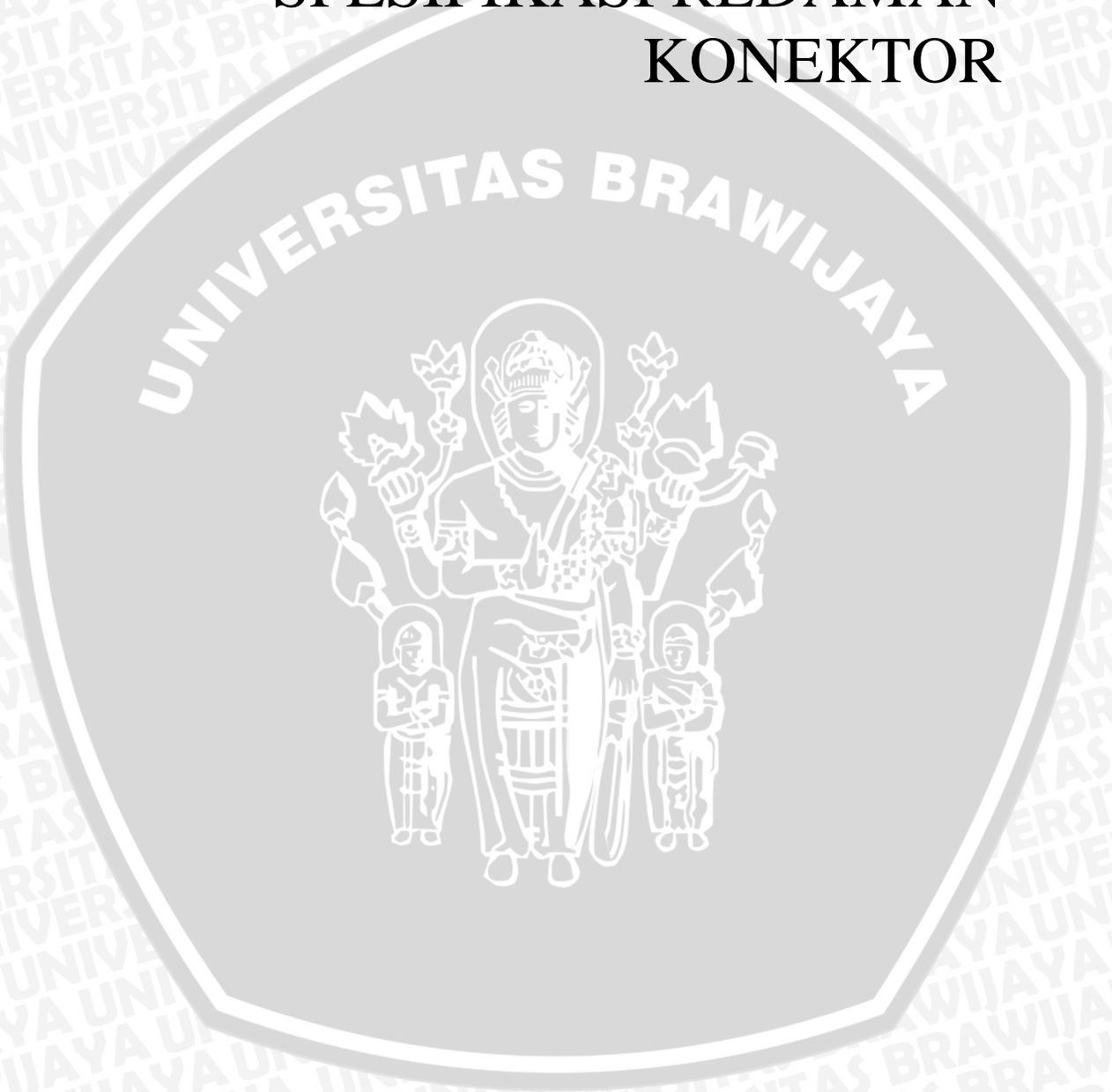
## SPESIFIKASI *SINGLE MODE FIBER*



## LAMPIRAN 2

---

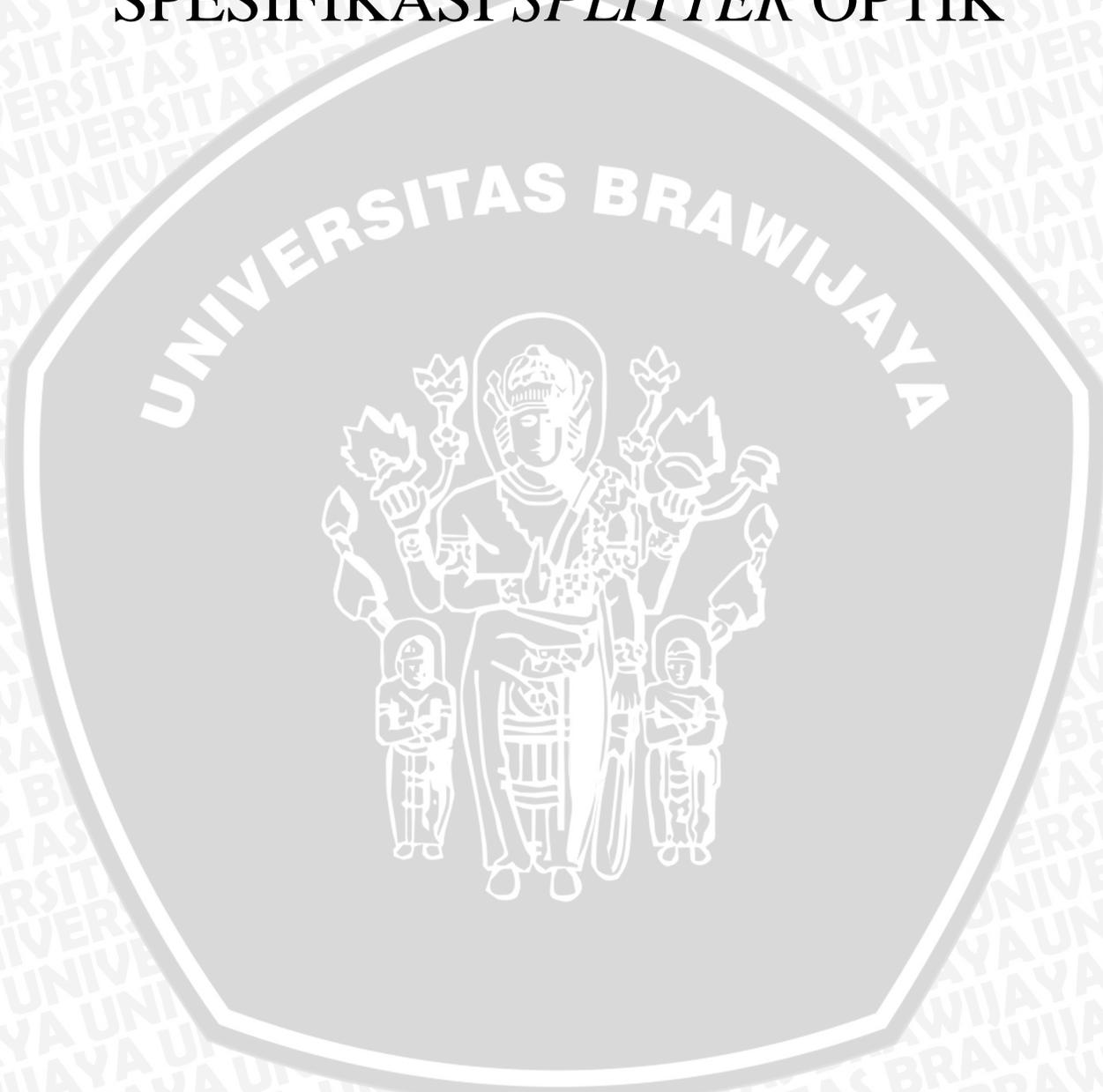
# SPESIFIKASI REDAMAN KONEKTOR



# LAMPIRAN 3

---

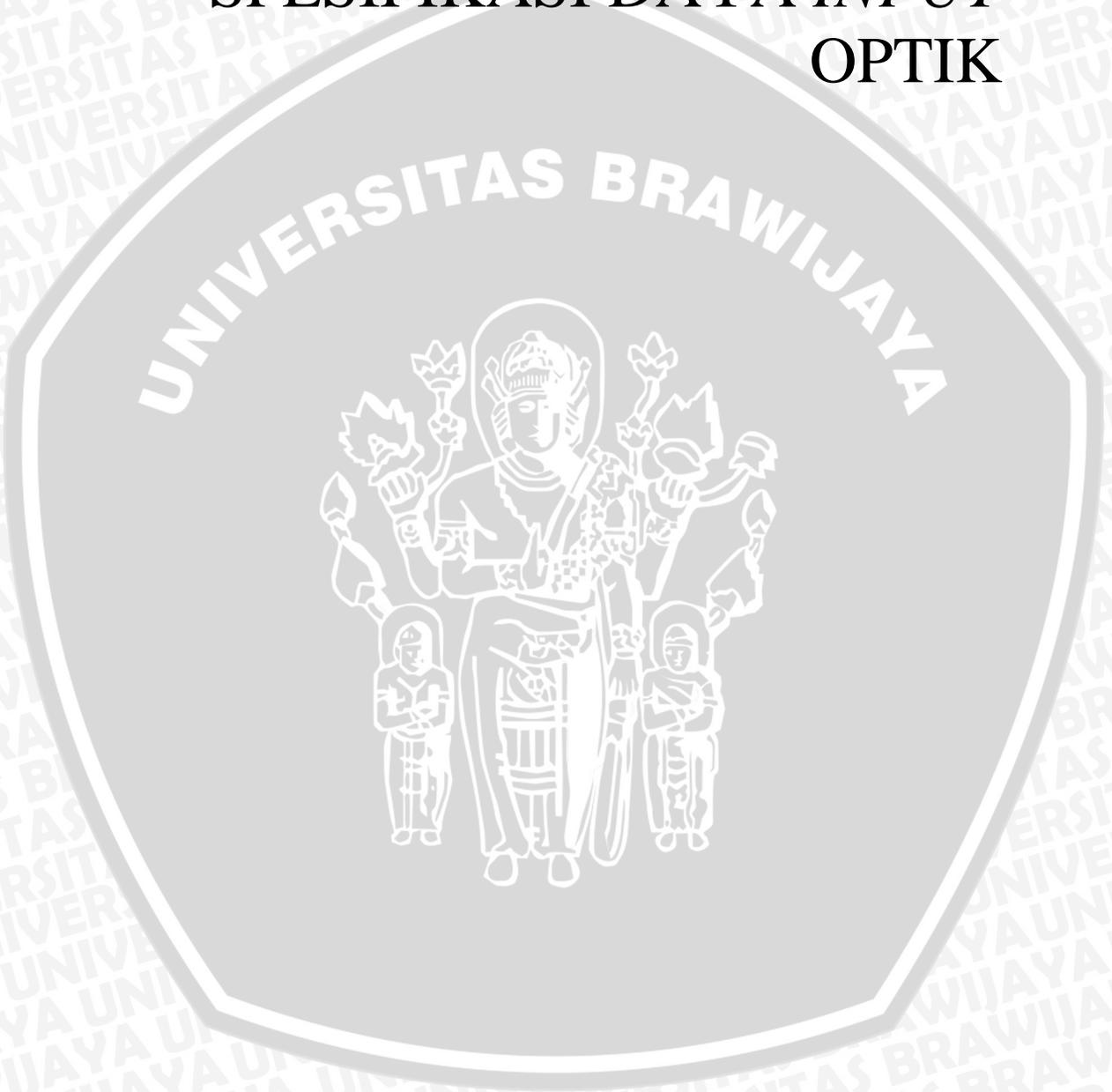
## SPEKIFIKASI *SPLITTER* OPTIK



# LAMPIRAN 4

---

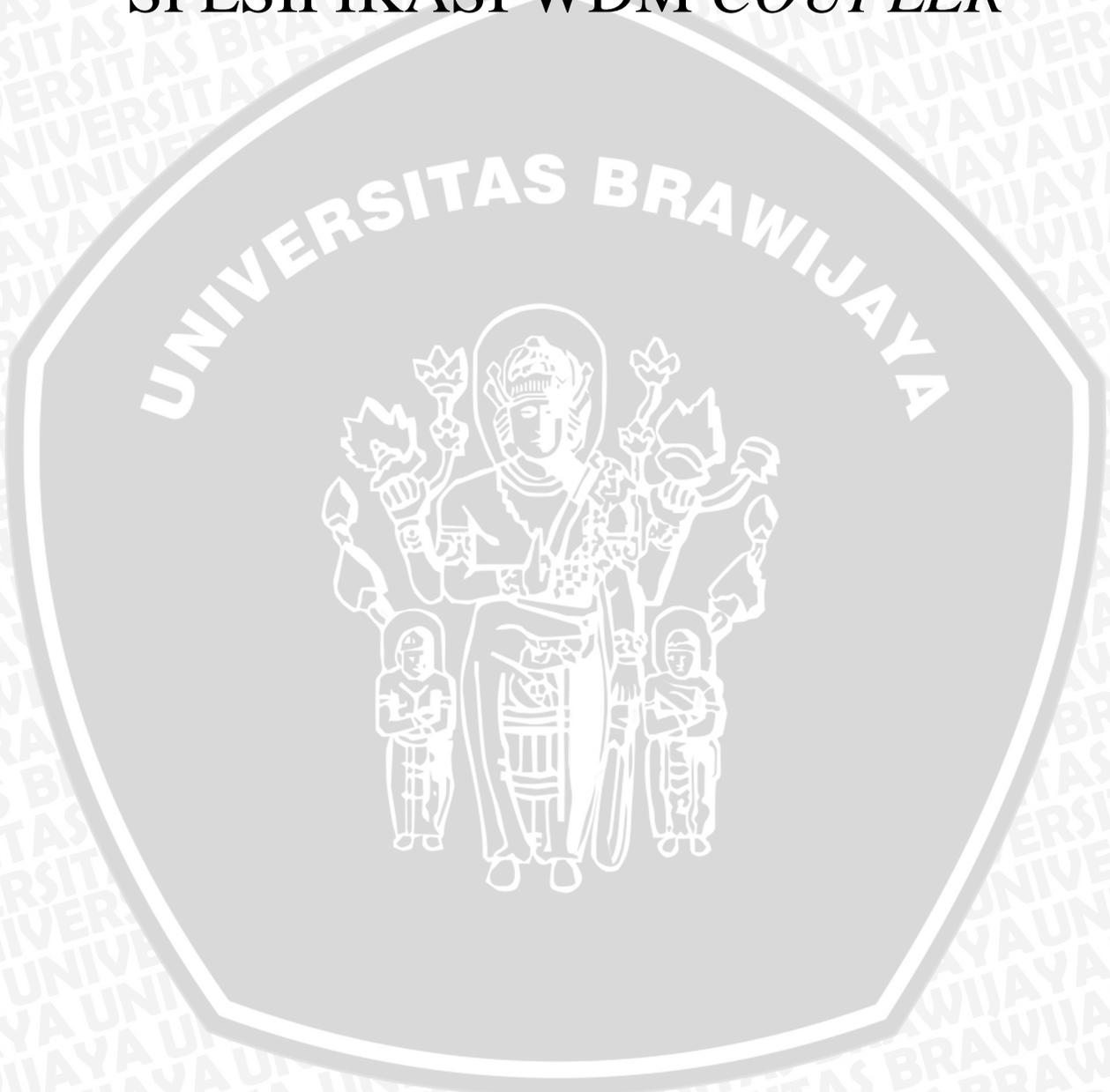
## SPESIFIKASI DAYA *INPUT* OPTIK



# LAMPIRAN 5

---

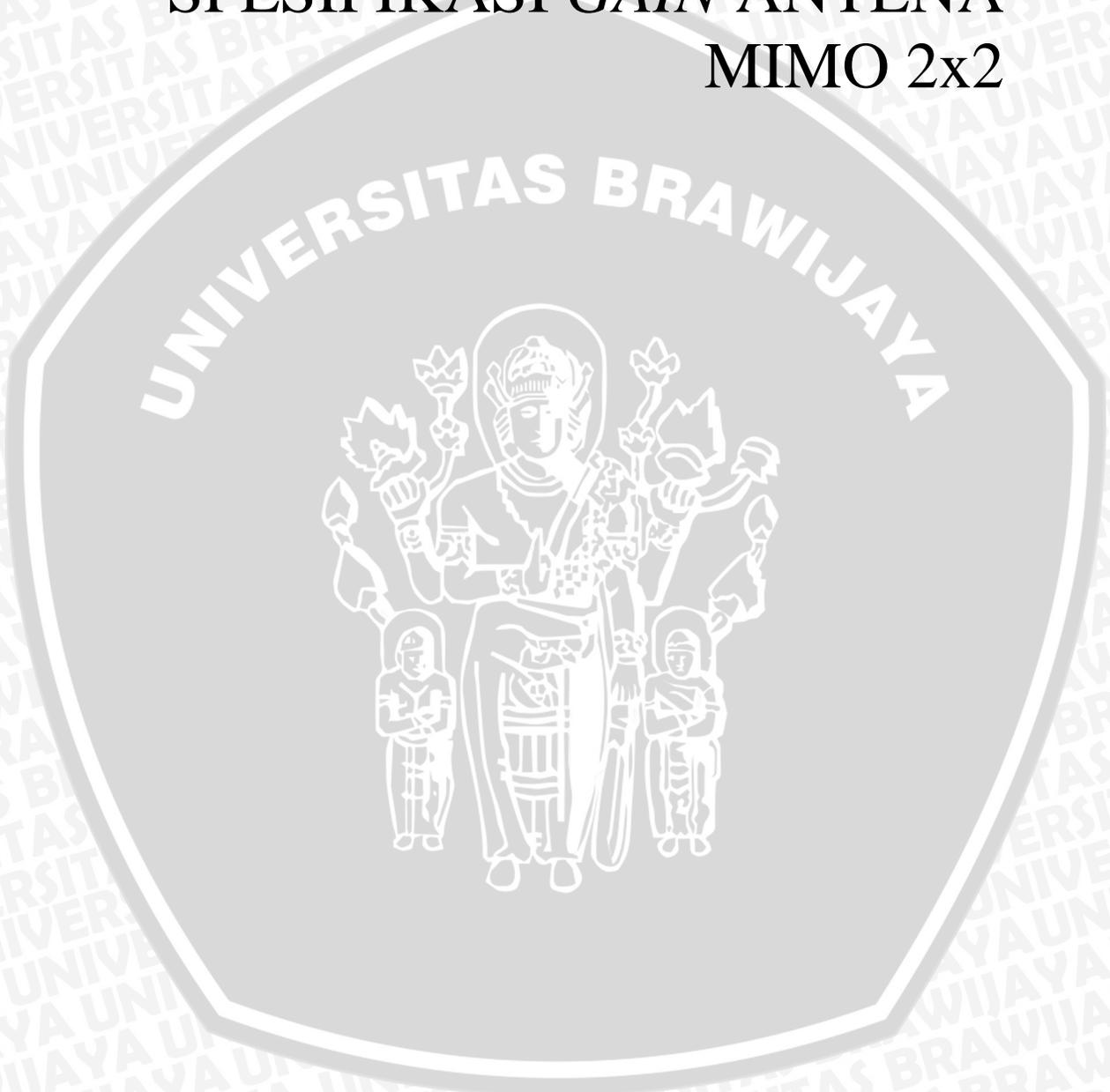
## SPEKIFIKASI WDM *COUPLER*



# LAMPIRAN 6

---

## SPEKIFIKASI GAIN ANTENA MIMO 2x2



# LAMPIRAN 7

---

## SPEKIFIKASI GAIN ANTENA SISO 1x1



## LAMPIRAN 8

### -Listing Program Matlab SNR sistem antena Jamak-

```

d=500:500:3000;           %range jarak pemancar dan penerima
B = 10000000;             %bandwidth sistem (Hz)
Gop=50;                   %gain optik (dB)
%menghitung Losses pada saluran optik
lf=20                     %panjang serat optik
alfa1=0.02;               %koefisien rugi optik 1550 nm(dB/km)
alfa2=0.03;               %koefisien rugi optik 1310 nm(dB/km)
ns=3;                     %jumlah sambungan (buah)
ls=0.5;                   %koefisien sambungan (dB)
nc=2;                     %jumlah konektor
lc=0.3;                   %koefisien conector (dB)
nsp=1;                    %jumlah splitter
lsp=3.9;                  %koefisien splitter (dB)
Lop1=2*((ns*ls)+(nc*lc)+(nsp*lsp)+(alfa1*lf));%rugi optik 1550 nm
(dB)
Lop2=2*((ns*ls)+(nc*lc)+(nsp*lsp)+(alfa2*lf));%rugi optik 1310 nm
(dB)
OL1=10^(-Lop1/10);
OL2=10^(-Lop2/10);
%menghitung noise pada saluran optik
rho = 0.75;               %responsivitas detektor (mA/mW), (A/W);
Po= 0.597;                %rata-rata daya optik(W)
PRFin=46;                 %daya dalam bentuk dBm
PRFinW=(10^4.6)/1000;    %daya dalam bentuk watt
x=sqrt(2*(PRFinW));
m=0.1;                    %indeks modulasi optik
Id = rho*((1+m*(x))*Po); %arus rata2 yg terdeteksi di detektor
q=1.6*10^(-19);          %banyak elektron
BW=8.5309*10^6;          %bandwidth sistem OFDMA
Ishot = (2*Id*q).*BW;    %shot noise
K=1.38*10^-23;           %konstanta boltzman
T=300;                   %suhu refrensi
R1=50;                   %hambatan sistem
Ith = ((4*K*T.*BW)./R1); %noise thermal
PRIN = 10^(-155/10);
Irin = (sqrt(PRIN*Id^2.*BW));%noise RIN
nop=(Ishot+Ith+Irin);    %total noise pada serat optik
%pathloss untuk propagasi outdoor, tipe B
f= 2600000000;           %frekuensi kerja (Hz)
d0 = 100;                %jarak referensi
s = 9.6;                 %shadow (dB)
%parameter terrain tipe B
a=4;

```

```

b= 0.0065;
c=17.1;
CP=0.0651;           %cyclic prefic
hb=30;              %tinggi antenna BS (m)
h = 1.5;            %tinggi antenna MS (m)
A= 20.*(log10(4*pi*f.*d./300000000));
gamma = (a-(b*hb)+(c/hb));
deltaPLf = (6*(log10(f/2000)));
deltaPLh = ((-10.8)*(log10 (h/2)));
Lel =((A + (10.*gamma.*log10 (d./d0))+ s + deltaPLf + deltaPLh))
%perhitungan SNR sistem antenna jamak 1550 nm
OSNRd1=(m^2*Id^2*PRFinW*OL1)./nop;
OSNR1=10*log10(OSNRd1);
SNR1=OSNRd1.*(1./(1+(Lel/Gop).^2));
SNRd1=10.^(SNR1/10);
SNRcpd1=(1-0.0651).*SNRd1;
SNRcp1=10.*log10(SNRcpd1);
SNR_SISO1=((1/1).*SNRcp1);
SNR_SIMO1=((2/1).*SNRcp1);
SNR_MIMO1=((2/2).*SNRcp1);
%perhitungan SNR sistem antenna jamak 1310 nm
OSNRd2=(m^2*Id^2*PRFinW*OL2)./nop;
OSNR2=10*log10(OSNRd2);
SNR2=OSNRd2.*(1./(1+(Lel/Gop).^2));
SNRd2=10.^(SNR2/10);
SNRcpd2=(1-0.0651).*SNRd2;
SNRcp2=10.*log10(SNRcpd2);
SNR_SISO2=((1/1).*SNRcp2);
SNR_SIMO2=((2/1).*SNRcp2);
SNR_MIMO2=((2/2).*SNRcp2);
plot
(d,SNR_SISO1,'r',d,SNR_SIMO1,'b',d,SNR_MIMO1,'g',d,SNR_SISO2,':r',d,SNR_SIMO2,':b',d,SNR_MIMO2,':g');
grid on;
xlabel('jarak eNB ke UE (m)')
ylabel('SNR sistem antenna jamak (dB)')
title('Grafik Pengaruh Jarak antara eNB dan UE Terhadap SNR sistem')
legend ('SISO 1x1 (1550nm)', 'SIMO 1x2 (1550nm)', 'MIMO 2x2 (1550 nm)', 'SISO 1x1 (1310nm)', 'SIMO 1x2 (1310nm)', 'MIMO 2x2 (1310 nm)');

```

## LAMPIRAN 9

### -Listing Program Matlab Kapasitas kanal sistem antena Jamak-

```

d=500:500:3000;           %range jarak pemancar dan penerima
B = 10000000;           %bandwidth sistem (Hz)
Gop=50;                 %gain optik (dB)
%menghitung Losses pada saluran optik
lf=20                   %panjang serat optik
alfa1=0.02;             %koefisien rugi optik 1550 nm(dB/km)
alfa2=0.03;             %koefisien rugi optik 1310 nm(dB/km)
ns=3;                   %jumlah sambungan (buah)
ls=0.5;                 %koefisien sambungan (dB)
nc=2;                   %jumlah konektor
lc=0.3;                 %koefisien conector (dB)
nsp=1;                  %jumlah splitter
lsp=3.9;                %koefisien splitter (dB)
Lop1=2*((ns*ls)+(nc*lc)+(nsp*lsp)+(alfa1*lf));%rugi optik 1550 nm
(dB)
Lop2=2*((ns*ls)+(nc*lc)+(nsp*lsp)+(alfa2*lf));%rugi optik 1310 nm
(dB)
OL1=10^(-Lop1/10);
OL2=10^(-Lop2/10);
%menghitung noise pada saluran optik
rho = 0.75;             %responsivitas detektor (mA/mW), (A/W);
Po= 0.597;             %rata-rata daya optik(W)
PRFin=46;              %daya dalam bentuk dBm
PRFinW=(10^4.6)/1000;  %daya dalam bentuk watt
x=sqrt(2*(PRFinW));
m=0.1;                 %indeks modulasi optik
Id = rho*((1+m*(x))*Po; %arus rata2 yg terdeteksi di detektor
q=1.6*10^(-19);        %banyak elektron
BW=8.5309*10^6;        %bandwidth sistem OFDMA
Ishot = (2*Id*q).*BW;  %shot noise
K=1.38*10^-23;         %konstanta boltzman
T=300;                 %suhu refrensi
R1=50;                 %hambatan sistem
Ith = ((4*K*T.*BW)./R1); %noise thermal
PRIN = 10^(-155/10);
Irin =(sqrt(PRIN*Id^2.*BW));%noise RIN
nop=(Ishot+Ith+Irin);  %total noise pada serat optik
%pathloss untuk propagasi outdoor, tipe B
f= 2600000000;         %frekuensi kerja (Hz)
d0 = 100;              %jarak referensi
s = 9.6;               %shadow (dB)
%parameter terrain tipe B
a=4;

```

```

b= 0.0065;
c=17.1;
CP=0.0651;           %cyclic prefic
hb=30;              %tinggi antena BS (m)
h = 1.5;            %tinggi antena MS (m)
A= 20.*(log10(4*pi*f.*d./300000000));
gamma = (a-(b*hb)+(c/hb));
deltaPLf = (6*(log10(f/2000)));
deltaPLh = ((-10.8)*(log10 (h/2)));
Lel =(A + (10.*gamma.*log10 (d./d0))+ s + deltaPLf + deltaPLh)
%perhitungan SNR sistem antena jamak 1550 nm
OSNRd1=(m^2*Id^2*PRFinW*OL1)./nop;
OSNR1=10*log10(OSNRd1);
SNR1=OSNRd1.*(1./(1+(Lel/Gop).^2));
SNRd1=10.^(SNR1/10);
SNRcpd1=(1-0.0651).*SNRd1;
SNRcp1=10.*log10(SNRcpd1);
SNR_SISO1=((1/1).*SNRcp1);
SNR_SIMO1=((2/1).*SNRcp1);
SNR_MIMO1=((2/2).*SNRcp1);
%perhitungan SNR sistem antena jamak 1310 nm
OSNRd2=(m^2*Id^2*PRFinW*OL2)./nop;
OSNR2=10*log10(OSNRd2);
SNR2=OSNRd2.*(1./(1+(Lel/Gop).^2));
SNRd2=10.^(SNR2/10);
SNRcpd2=(1-0.0651).*SNRd2;
SNRcp2=10.*log10(SNRcpd2);
SNR_SISO2=((1/1).*SNRcp2);
SNR_SIMO2=((2/1).*SNRcp2);
SNR_MIMO2=((2/2).*SNRcp2);
%input data untuk mencari bandwith sinyal serat optik 1550 nm
Dm=18e-12;          %koefisien dispersi 1550 nm
tsumber=16e-12;
treceiver=25e-12;
delta_lambda=0.1;
tmat=Dm*delta_lambda*lf;
tsistem=sqrt((tsumber^2)+(treceiver^2)+(tmat^2));
BW_optik1=0.44/(tsistem*lf);
C1=BW_optik1*log2(1+10.^(SNR_SISO1/10));
C2=BW_optik1*log2(1+10.^(SNR_SIMO1/10));
C3=BW_optik1*log2(1+10.^(SNR_MIMO1/10));
%Kapasitas kanal sistem antena jamak
C_SISO1=(1.*C1);
C_SIMO1=(1.*C2);
C_MIMO1=(2.*C3);
%input data untuk mencari bandwith sinyal serat optik 1310 nm
Dm=14e-12;          %koefisien dispersi 1310 nm
tsumber=16e-12;
treceiver=25e-12;
delta_lambda=0.1;
tmat=Dm*delta_lambda*lf;
tsistem=sqrt((tsumber^2)+(treceiver^2)+(tmat^2));

```

```
BW_optik2=0.44/(tsistem*lf);
C4=BW_optik2*log2(1+10.^(SNR_SISO2/10));
C5=BW_optik2*log2(1+10.^(SNR_SIMO2/10));
C6=BW_optik2*log2(1+10.^(SNR_MIMO2/10));
%Kapasitas kanal sistem antena jamak
C_SISO2=(1.*C4);
C_SIMO2=(1.*C5);
C_MIMO2=(2.*C6);
plot
(d,C_SISO1,'r',d,C_SIMO1,'b',d,C_MIMO1,'g',d,C_SISO2,':r',d,C_SIMO2,':b',d,C_MIMO2,':g');
grid on;
xlabel('jarak eNB ke UE (m)')
ylabel('Kapasitas kanal antena jamak (bps)')
title('Grafik Kapasitas kanal sistem Pada Jarak yang Berbeda untuk Panjang Gelombang 1550 nm')
legend('SISO 1x1 (1550nm)', 'SIMO 1x2 (1550nm)', 'MIMO 2x2 (1550nm)', 'SISO 1x1 (1310nm)', 'SIMO 1x2 (1310nm)', 'MIMO 2x2 (1310nm)')
```



## LAMPIRAN 10

### -Listing Program Matlab BER sistem antena Jamak-

```

d=500:500:3000;           %range jarak pemancar dan penerima
B = 10000000;            %bandwidth sistem (Hz)
Gop=50;                  %gain optik (dB)
%menghitung Losses pada saluran optik
lf=20                    %panjang serat optik
alfa1=0.02;              %koefisien rugi optik 1550 nm(dB/km)
alfa2=0.03;              %koefisien rugi optik 1310 nm(dB/km)
ns=3;                    %jumlah sambungan (buah)
ls=0.5;                  %koefisien sambungan (dB)
nc=2;                    %jumlah konektor
lc=0.3;                  %koefisien conector (dB)
nsp=1;                   %jumlah splitter
lsp=3.9;                 %koefisien splitter (dB)
Lop1=2*((ns*ls)+(nc*lc)+(nsp*lsp)+(alfa1*lf));%rugi optik 1550 nm
(dB)
Lop2=2*((ns*ls)+(nc*lc)+(nsp*lsp)+(alfa2*lf));%rugi optik 1310 nm
(dB)
OL1=10^(-Lop1/10);
OL2=10^(-Lop2/10);
%menghitung noise pada saluran optik
rho = 0.75;              %responsivitas detektor (mA/mW), (A/W);
Po= 0.597;               %rata-rata daya optik(W)
PRFin=46;                %daya dalam bentuk dBm
PRFinW=(10^4.6)/1000;    %daya dalam bentuk watt
x=sqrt(2*(PRFinW));
m=0.1;                   %indeks modulasi optik
Id = rho*((1+m*(x))*Po); %arus rata2 yg terdeteksi di detektor
q=1.6*10^(-19);         %banyak elektron
BW=8.5309*10^6;          %bandwidth sistem OFDMA
Ishot = (2*Id*q).*BW;    %shot noise
K=1.38*10^-23;           %konstanta boltzman
T=300;                   %suhu refrensi
R1=50;                   %hambatan sistem
Ith = ((4*K*T.*BW)./R1); %noise thermal
PRIN = 10^(-155/10);
Irin = (sqrt(PRIN*Id^2.*BW));%noise RIN
nop=(Ishot+Ith+Irin);    %total noise pada serat optik
%pathloss untuk propagasi outdoor, tipe B
f= 2600000000;           %frekuensi kerja (Hz)
d0 = 100;                %jarak referensi
s = 9.6;                 %shadow (dB)
%parameter terrain tipe B
a=4;

```

```

b= 0.0065;
c=17.1;
CP=0.0651;           %cyclic prefic
hb=30;              %tinggi antenna BS (m)
h = 1.5;            %tinggi antenna MS (m)
A= 20.*(log10(4*pi*f.*d./300000000));
gamma = (a-(b*hb)+(c/hb));
deltaPLf = (6*(log10(f/2000)));
deltaPLh = ((-10.8)*(log10(h/2)));
Lel = (A + (10.*gamma.*log10(d./d0)) + s + deltaPLf + deltaPLh)
%perhitungan SNR sistem antenna jamak 1550 nm
OSNRd1=(m^2*Id^2*PRFinW*OL1)./nop;
OSNR1=10*log10(OSNRd1);
SNR1=OSNRd1.*(1./(1+(Lel/Gop).^2));
SNRd1=10.^(SNR1/10);
SNRcpd1=(1-0.0651).*SNRd1;
SNRcp1=10.*log10(SNRcpd1);
SNR_SISO1=((1/1).*SNRcp1);
SNR_SIMO1=((2/1).*SNRcp1);
SNR_MIMO1=((2/2).*SNRcp1);
%perhitungan SNR sistem antenna jamak 1310 nm
OSNRd2=(m^2*Id^2*PRFinW*OL2)./nop;
OSNR2=10*log10(OSNRd2);
SNR2=OSNRd2.*(1./(1+(Lel/Gop).^2));
SNRd2=10.^(SNR2/10);
SNRcpd2=(1-0.0651).*SNRd2;
SNRcp2=10.*log10(SNRcpd2);
SNR_SISO2=((1/1).*SNRcp2);
SNR_SIMO2=((2/1).*SNRcp2);
SNR_MIMO2=((2/2).*SNRcp2);
%perhitungan Eb/No (1550 nm)
Rtot=44.7*10^6;
EbNo_SISO1=SNR_SISO1+10*log10(BW/Rtot);
EbNo_SIMO1=SNR_SIMO1+10*log10(BW/Rtot);
EbNo_MIMO1=SNR_MIMO1+10*log10(BW/Rtot);
%perhitungan Eb/No (1310 nm)
Rtot=44.7*10^6;
EbNo_SISO2=SNR_SISO2+10*log10(BW/Rtot);
EbNo_SIMO2=SNR_SIMO2+10*log10(BW/Rtot);
EbNo_MIMO2=SNR_MIMO2+10*log10(BW/Rtot);
%perhitungan BER 1550 nm
M=6;
Mod=64;
phi=3.14;
x_SISO1=sqrt(3*M./(Mod-1)*EbNo_SISO1);
x_SIMO1=sqrt(3*M./(Mod-1)*EbNo_SIMO1);
x_MIMO1=sqrt(3*M./(Mod-1)*EbNo_MIMO1);
a_SISO1=exp(-(x_SISO1).^2);
a_SIMO1=exp(-(x_SIMO1).^2);
a_MIMO1=exp(-(x_MIMO1).^2);
b_SISO1=sqrt(phi*x_SISO1);
b_SIMO1=sqrt(phi*x_SIMO1);

```

```

b_MIMO1=sqrt(phi*x_MIMO1);
erfc_SISO1=a_SISO1./b_SISO1;
erfc_SIMO1=a_SIMO1./b_SIMO1;
erfc_MIMO1=a_MIMO1./b_MIMO1;
Pbe_SISO1=2*(sqrt(Mod)-1)/sqrt((Mod)*M)*erfc_SISO1;
Pbe_SIMO1=2*(sqrt(Mod)-1)/sqrt((Mod)*M)*erfc_SIMO1;
Pbe_MIMO1=2*(sqrt(Mod)-1)/sqrt((Mod)*M)*erfc_MIMO1;
%perhitungan BER 1310 nm
x_SISO2=sqrt(3*M./(Mod-1)*EbNo_SISO2);
x_SIMO2=sqrt(3*M./(Mod-1)*EbNo_SIMO2);
x_MIMO2=sqrt(3*M./(Mod-1)*EbNo_MIMO2);
a_SISO2=exp(-(x_SISO2).^2);
a_SIMO2=exp(-(x_SIMO2).^2);
a_MIMO2=exp(-(x_MIMO2).^2);
b_SISO2=sqrt(phi*x_SISO2);
b_SIMO2=sqrt(phi*x_SIMO2);
b_MIMO2=sqrt(phi*x_MIMO2);
erfc_SISO2=a_SISO2./b_SISO2;
erfc_SIMO2=a_SIMO2./b_SIMO2;
erfc_MIMO2=a_MIMO2./b_MIMO2;
Pbe_SISO2=2*(sqrt(Mod)-1)/sqrt((Mod)*M)*erfc_SISO2;
Pbe_SIMO2=2*(sqrt(Mod)-1)/sqrt((Mod)*M)*erfc_SIMO2;
Pbe_MIMO2=2*(sqrt(Mod)-1)/sqrt((Mod)*M)*erfc_MIMO2;
%Grafik Pengaruh Jarak terhadap BER
figure (1)
plot
(d,Pbe_SISO1,'r',d,Pbe_SIMO1,'b',d,Pbe_MIMO1,'g',d,Pbe_SISO2,':r',d,P
be_SIMO2,':b',d,Pbe_MIMO2,':g');
hold on
grid on
legend('SISO 1x1(1550nm)', 'SIMO 1x2(1550nm)', 'MIMO 2x2(1550nm)', 'SISO
1x1(1310nm)', 'SIMO 1x2(1310nm)', 'MIMO 2x2(1310nm)');
title ('Grafik Pengaruh UE dan eNB Terhadap BER sistem');
xlabel('Jarak antara eNB dan UE (m)');
ylabel('BER sistem antenna jamak');

```

# LAMPIRAN 11

## -Listing Program Matlab *Link Power Budget* antena Jamak-

```

d=500:500:3000;           %jarak antara eNB dan UE dalam meter
Pt=0.5;                   %daya pancar pada serat optik
SM=6;                     %safety margin
%Link Budget serat optik
lf=20;                    %panjang serat optik
alfa1=0.02;               %koefisien redaman 1550 nm (dB/km)
alfa2=0.03;               %koefisien redaman 1310 nm (dB/km)
ns=3;                     %jumlah sambungan (buah)
ls=0.5;                   %koefisien sambungan (dB)
nc=2;                     %jumlah konektor
lc=0.3;                   %koefisien conector (dB)
nsp=1;                    %jumlah splitter
lsp=3.9;                  %koefisien splitter (dB)
ncp=1;                    %jumlah coupler
lcp=0.7;                  %koefisien coupler (dB)
Lop1=((ns*ls)+(nc*lc)+(nsp*lsp)+(alfa1*lf)+(ncp*lcp));%rugi optik
1550nm(dB)
Lop2=((ns*ls)+(nc*lc)+(nsp*lsp)+(alfa2*lf)+(ncp*lcp));%rugi optik
1310nm (dB)
Pr1=Pt-Lop1-SM;           %daya terima pada serat optik 1550 nm
Pr2=Pt-Lop2-SM;           %daya terima pada serat optik 1310 nm

%perhitungan path loss
f= 2600000000;            %frekuensi kerja (Hz)
d0 = 100;                  %jarak referensi
s = 9.6;                   %shadow (dB)
a=4;
b= 0.0065;
c=17.1;
hb=30;                     %tinggi antenna BS (m)
h = 1.5;                   %tinggi antenna MS (m)
A= 20.*(log10(4*pi*f.*d./300000000));
gamma = (a-(b*hb)+(c/hb));
deltaPLf = (6*(log10(f/2000)));
deltaPLh = ((-10.8)*(log10 (h/2)));
PL =((A + (10.*gamma.*log10 (d./d0))+ s + deltaPLf + deltaPLh));
%gain pemancar antenna jamak
Gt_MIMO=17;
Gt_SISO=16;
Gt_SIMO=0;
%gain penerima antenna jamak
Gr_MIMO=0;

```

```
Gr_SISO=0;
Gr_SIMO=18;
Am=-95.5;
%daya yang diterima dengan panjang gelombang 1550 nm
Pr_SISO1=Pr1+Gt_SISO+Gr_SISO-PL-Am;
Pr_MIMO1=Pr1+Gt_MIMO+Gr_MIMO-PL-Am;
Pr_SIMO1=Pr1+Gt_SIMO+Gr_SIMO-PL-Am;
%daya yang diterima dengan panjang gelombang 1310 nm
Pr_SISO2=Pr2+Gt_SISO+Gr_SISO-PL-Am;
Pr_MIMO2=Pr2+Gt_MIMO+Gr_MIMO-PL-Am;
Pr_SIMO2=Pr2+Gt_SIMO+Gr_SIMO-PL-Am;
figure (1)
plot(d,Pr_SISO1,'b',d,Pr_SISO2,'r');
hold on;
grid on;
legend ('1550 nm','1310 nm')
xlabel('jarak eNB ke UE (m)')
ylabel('Daya yang diterima (dBm)')
title('Grafik besarnya daya yang diterima Pada Jarak yang Berbeda
untuk SISO 1x1');
figure (2)
plot(d,Pr_SIMO1,'b',d,Pr_SIMO2,'r');
hold on;
grid on;
legend ('1550 nm','1310 nm')
xlabel('jarak eNB ke UE (m)')
ylabel('Daya yang diterima (dBm)')
title('Grafik besarnya daya yang diterima Pada Jarak yang Berbeda
untuk SIMO 1x2');
figure (3)
plot(d,Pr_MIMO1,'b',d,Pr_MIMO2,'r');
hold on;
grid on;
legend ('1550 nm','1310 nm')
xlabel('jarak eNB ke UE (m)')
ylabel('Daya yang diterima (dBm)')
title('Grafik besarnya daya yang diterima Pada Jarak yang Berbeda
untuk MIMO 2x2');
```