

# 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)

Alfi Zuhriya Khoirunnisaa<sup>1</sup>, Endah Budi Purnomowati<sup>2</sup>, Ali Mustofa<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya

**Abstrak**— *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 eNB 500 m dan panjang gelombang 1550 nm menghasilkan performansi terbaik pada parameter SNR = 52,002 dB, BER =  $6 \times 10^{-7}$  dengan daya yang diterima di UE = -72,034 dBm pada perhitungan *Link Power Budget*. Penggunaan antena MIMO 2x2 dengan jarak UE dan eNB 500 m dan panjang gelombang 1310 nm menghasilkan performansi terbaik pada parameter kapasitas kanal yaitu sebesar 8,492 Gbps.

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

## I. PENDAHULUAN

Jaringan 4G atau *Long Term Evolution* (LTE) memiliki keunggulan yang tidak dimiliki oleh jaringan sebelumnya yaitu penggunaan akses jamak *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA) pada sisi *downlink* dan *Single Carrier Frequency Division Multiple Access* (SC-FDMA) pada sisi *uplink*. Hal inilah yang menyebabkan pengiriman data pada teknologi LTE memiliki kecepatan mencapai 100 Mbps untuk *downlink* dan 50 Mbps untuk *uplink*. Namun teknologi ini masih memiliki kelemahan diantaranya memiliki cakupan yang terbatas serta memerlukan biaya yang tinggi akibat dari pembangunan *base station* yang banyak. Untuk mengatasi permasalahan tersebut maka munculah teknologi *Radio over Fiber*. [1]

Teknologi *Radio over Fiber* yang merupakan integrasi dari teknologi nirkabel dan kabel. teknologi ini menggunakan serat optik di sisi kabel fisiknya sehingga dapat menjangkau daerah yang cukup jauh serta memiliki rugi-rugi yang kecil. Selain itu juga dapat menekan biaya operasional karena adanya *sharing* infrastruktur pada *base station*. Teknologi RoF dapat melayani layanan yang memerlukan *bandwidth* yang tinggi karena memiliki

kapasitas sistem komunikasi nirkabel yang tinggi dan cakupan daerah yang luas. [2]

Perkembangan *Radio over Fiber* selanjutnya adalah pada sisi antenanya, yaitu digunakan teknik antena jamak *Multiple Input Multiple Output* (MIMO). Teknik MIMO dewasa ini banyak digunakan di dalam sistem komunikasi nirkabel. MIMO 2x2 secara signifikan dapat meningkatkan kapasitas kanal transmisi [3]

Pada penelitian ini akan dilakukan analisis performansi MIMO 2x2 yang dikombinasikan dengan OFDMA pada *radio over fiber* terhadap beberapa parameter diantaranya : *Signal to Noise Ratio* (SNR), *Bit Error Rate* (BER), Kapasitas kanal dan *Link Power Budget* yang akan dibandingkan dengan teknik antena jamak *Single Input Single Output* (SISO) 1x1 dan *Single Input Multiple Output* (SIMO) 1x2.

Lingkup kajian pada penelitian ini dibatasi pada :

1. Sistem multipleksing yang digunakan adalah *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA) pada sisi *downlink* LTE
2. Sistem Pembanding meliputi SIMO 1x2 dan SISO 1x1
3. MIMO 2x2 menggunakan skema *Spatial Multiplexing* (SM)
4. Jenis Modulasi yang digunakan adalah modulasi 64-QAM
5. Tipe serat optik yang digunakan adalah serat optik *single mode* dengan panjang gelombang 1550 nm dan 1310 nm
6. Parameter yang akan dianalisis meliputi SNR, BER, Kapasitas kanal dan *Link Power Budget*.
7. Proses pengambilan data melalui simulasi menggunakan *software* Matlab 7.04

## II. TINJAUAN PUSTAKA

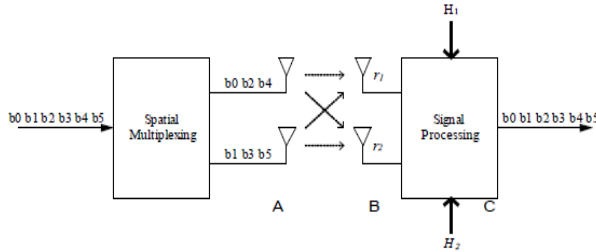
### A. *Long Term Evolution* (LTE) release 8

*Long Term Evolution* (LTE) release 8 atau lebih dikenal dengan jaringan 4G yang dikeluarkan oleh *Third Generation Partnership Project* (3GPP) merupakan jaringan dalam rangka mengakomodasi peningkatan penggunaan *mobile data* dan aplikasi baru multimedia yang memiliki *bandwidth* yang besar dengan kapasitas data yang tinggi dan QoS yang baik. [4]

Keseluruhan arsitektur LTE disebut dengan 3GPP *Evolved Packet System* (EPS) yang terdiri dari 4 bagian yaitu *User Equipment* (UE), *Evolved - UMTS Terrestrial Radio Access Network* (E-UTRAN), *Evolved Packet Core* (EPC) dan *Interface* jaringan.

## B. Multi Input Multiple Output Orthogonal Frequency Division Multiple Access (MIMO-OFDMA) pada Long Term Evolution (LTE)

OFDMA merupakan metode akses jamak yang digunakan pada kanal *downlink* LTE. OFDMA melayani *multiple users* yang dialokasikan kedalam banyak *subcarrier* yang terdistribusi acak, sejumlah *subcarrier* yang berbeda dinyatakan pada frekuensi yang sama untuk pengguna yang berbeda.[5]

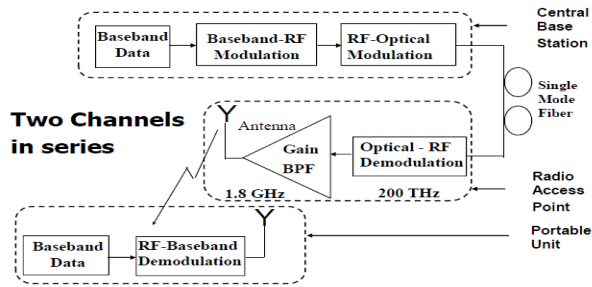


Gambar 1. Skema *Spatial Multiplexing* [6]

Perkembangan LTE selanjutnya, digunakan teknik antenna jamak *Multiple Input Multiple Output* (MIMO) pada OFDMA sehingga dapat meningkatkan kapasitas sistem jaringan. Dengan menggunakan skema *spatial multiplexing* pada **Gambar 1** aliran data berlaju tinggi dipecah menjadi sejumlah aliran paralel sesuai dengan jumlah antenna pemancar dengan laju rata-rata  $1/M$  dari laju data aslinya dengan *bandwidth* yang sama sehingga lebih efisien.

## C. Radio over Fiber (RoF)

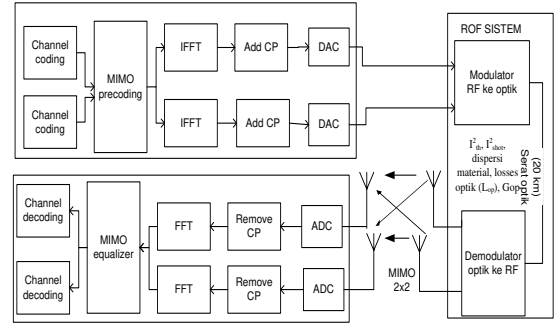
*Radio over Fiber* adalah teknologi baru yang mengintegrasikan antara teknologi nirkabel dan kabel. Sinyal dari BSC menuju BS/RAU ditransmisikan melalui media serat optik yang kemudian sinyal tersebut ditransmisikan ke penerima menggunakan pentransmisian secara nirkabel. [7]



Gambar 2. Arsitektur Radio over Fiber [3]

**Gambar 2** menjelaskan bahwa sinyal yang dihasilkan oleh BSC berupa sinyal RF yang kemudian dimodulasi langsung oleh modulator optik, dengan sumber optik berupa laser. Setelah itu, sinyal optik tersebut dikirimkan ke BS/RAU menggunakan serat optik. Kemudian sinyal optik tersebut diubah kembali kedalam bentuk sinyal RF oleh demodulator RF yang sebelumnya sinyal optik dikuatkan sebesar  $G_{op}$ . Sinyal dalam bentuk RF tersebut kemudian ditransmisikan secara nirkabel melalui antenna hingga ke sisi *Portabel Unit/User Equipment*, di dalam UE kemudian terjadi proses demodulasi sinyal RF menjadi frekuensi *baseband*.

## D. Performansi Sistem MIMO-OFDMA pada Teknologi Radio over Fiber



Gambar 3. Konfigurasi MIMO-OFDMA pada Teknologi Radio over Fiber

### a. Redaman Propagasi Ruang Bebas

Propagasi gelombang radio pada penelitian ini bekerja pada kondisi NLOS, maka *pathloss* dengan menggunakan pemodelan *Erceg* dapat ditentukan dengan persamaan :

$$PL = A + 10\gamma \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) + s + \Delta PL_f + \Delta PL_h \quad (1)$$

$PL$  = rugi-rugi propagasi (dB)

$A$  = *pathloss* referensi (dB)

$\gamma$  = eksponen *pathloss*

$d$  = jarak pemancar ke penerima (m)

$d_0$  = 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

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

Teknologi *radio over Fiber* terdapat dua macam propagasi, nirkabel dan kabel. Sehingga SNR sistem *radio over fiber* adalah : [8]

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

SNR = *signal to noise ratio* (dB)

$m$  = indeks modulasi optik

$I_D$  = arus DC rata-rata yang terdeteksi

$E[s^2(t)] = P_{RF, in}$  = daya masukan RF (daya pancar)

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

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

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

$G_{op}$  = gain *amplifier* optik

Dimana besarnya *noise* pada saluran optik ( $n_{op}$ ) ditentukan dengan persamaan : [5]

$$\langle n_{op}^2 \rangle = \langle I_{shot}^2 \rangle + \langle I_{RIN}^2 \rangle + \langle I_{th}^2 \rangle \quad (3)$$

$I_{shot}^2$  = *Shot noise*

$I_{RIN}^2$  = *RIN noise*

$I_{th}^2$  = *Thermal noise*

Besarnya SNR sistem setelah penyisipan *cyclic prefix* diperoleh dari : [6]

$$SNR_{sistem} = (1 - \alpha_{CP})SNR \quad (4)$$

$SNR_{sistem}$  = *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 antenna yang digunakan. SNR sistem antenna jamak dapat dituliskan dengan : [6]

$$SNR_{sistem} = \frac{N^2 x P/M}{NxN_o} = \frac{NxP}{MxN_o} = \frac{N}{M} x SNR \quad (5)$$

$SNR_{antena\_jamak}$  = *signal to noise ratio* sistem antenna jamak (dB)  
 $SNR_{sistem}$  = *signal to noise ratio* sistem (dB)  
 $M$  = jumlah antenna *transmitter*  
 $N$  = jumlah antenna *receiver*

#### c. Kapasitas Kanal

Kapasitas kanal sistem dipengaruhi oleh SNR, *bandwidth* sistem dan jumlah antenna pemancar, berdasarkan teorema Shannon kapasitas kanal dapat diperoleh dengan persamaan : [9]

$$C_{sistem} = MxB \log_2(1 + SNR_{sistem}) \quad (6)$$

$C_{sistem}$  = kapasitas kanal sistem antenna jamak (bps)  
 $M$  = jumlah antenna *transmitter*  
 $B_{sistem}$  = *bandwidth* sistem (Hz)  
 $SNR_{sistem}$  = *signal to noise ratio* sistem

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

Perhitungan BER dipengaruhi oleh  $E_b/N_o$  yang dapat ditentukan dengan persamaan : [9]

$$\left(\frac{E_b}{N_o}\right)_{antena\_jamak} = SNR_{antena\_jamak} + 10 \log \frac{B_{sistem}}{R} \quad (7)$$

BER pada penelitian ini hanya menggunakan sistem dengan teknik modulasi 64-QAM yang dapat dihitung dengan persamaan :

$$P_{b,M-QAM} = \frac{2(\sqrt{M_s}-1)}{\sqrt{M_s} \log_2 M_s} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{3 \log_2 M_s E_b}{4(M_s-1) N_o}} \right) \quad (8)$$

$P_{b,M-QAM}$  = 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)  
 $R$  = laju data  
 $B_{sistem}$  = *bandwidth* sistem  
 $\operatorname{erfc}$  = *error function complementary*  
dimana  $\operatorname{erfc}(x) \approx \frac{1}{\sqrt{\pi}x} e^{-x^2}$

#### e. Link Power Budget

Parameter *link power budget* pada RoF terdiri dari perhitungan *link power budget* di sisi nirkabel dan kabel.

Perhitungan Link Power Budget di sisi kabel fisik (media serat optik) adalah : [10]

$$P_{tx} - P_{rx} = a_{total} + SM \quad (9)$$

$$a_{total} = (a_f L_f) + (n_s l_s) + (n_c l_c) + (n_{sp} l_{sp}) + (L_{coupler}) \quad (10)$$

$P_{tx}$  = Daya output pemancar (dBm)  
 $P_{rx}$  = Sensitifitas penerima (dBm)  
 $a_{total_s}$  = Rugi-rugi saluran serat optik (dBm)  
 $SM$  = Safety margin (6 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)

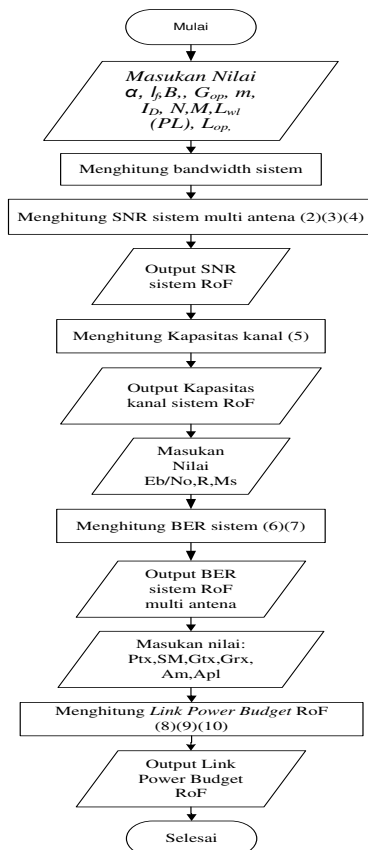
Perhitungan *Link Power Budget* di sisi nirkabel :

$$P_{tx} + G_{tx} - A_{pl} + G_{rx} - A_m = P_{rx} \quad (11)$$

$P_{tx}$  = 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)

### III. METODOLOGI PENELITIAN

Metode perhitungan dan analisis data yang digunakan dalam pembahasan skripsi ini adalah mengumpulkan data sekunder berupa nilai parameter sesuai dengan standar LTE release 8, *radio over fiber* dan OFDMA yang kemudian diolah dalam rumus menggunakan bantuan *software* matlab 7.04. Parameter yang akan dibahas pada penelitian ini meliputi SNR, Kapasitas kanal, BER dan *Link Power Budget* dengan teknik antenna jamak yang digunakan adalah SISO 1x1, SIMO 1x2 dan MIMO 2x2. Berikut langkah-langkah perhitungan untuk mendapatkan performansi yang diinginkan :



Gambar 4. Diagram Alir Perhitungan Performansi Sistem

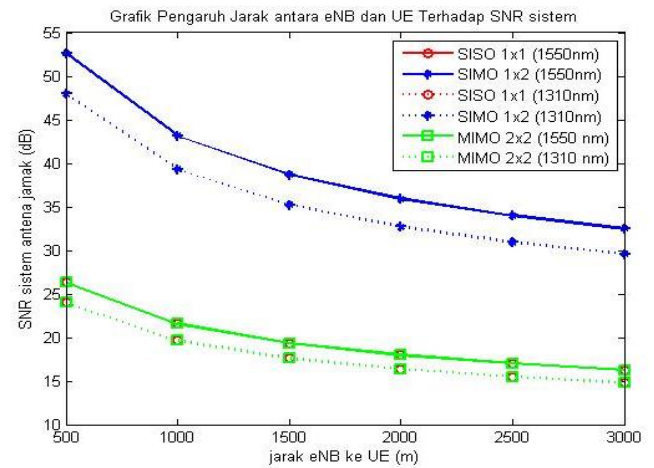
#### IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dianalisis mengenai pembahasan pengaruh penggunaan teknik antenna jamak SISO 1x1, SIMO 1x2 dan MIMO 2x2 terhadap kinerja OFDMA dengan teknologi *radio over fiber*. Analisis yang akan dilakukan meliputi parameter SNR, Kapasitas kanal, BER dan *Link Power Budget*. Hasil simulasi, analisis dan pembahasan diuraikan sebagai berikut :

##### A. Analisis Signal to Noise Ratio pada Radio over fiber dengan Penerapan MIMO-OFDMA

Perhitungan SNR pada teknologi *radio over fiber* terdiri dari kanal dengan media serat optik yang dipengaruhi oleh *losses* optik ( $L_{op}$ ) dan *noise* optik ( $n_{op}$ ) dan kanal nirkabel (kanal AWGN) pada kondisi NLOS yang dipengaruhi oleh redaman propagasi ruang bebas ( $L_{el}$ ).

Nilai SNR diperoleh dari perhitungan menggunakan persamaan (2) dan (4) dimana nilai SNR sistem dipengaruhi oleh *cyclic prefix*, kemudian dilakukan perhitungan dengan persamaan (5) untuk mengetahui pengaruh penggunaan teknik antenna jamak terhadap SNR sistem.

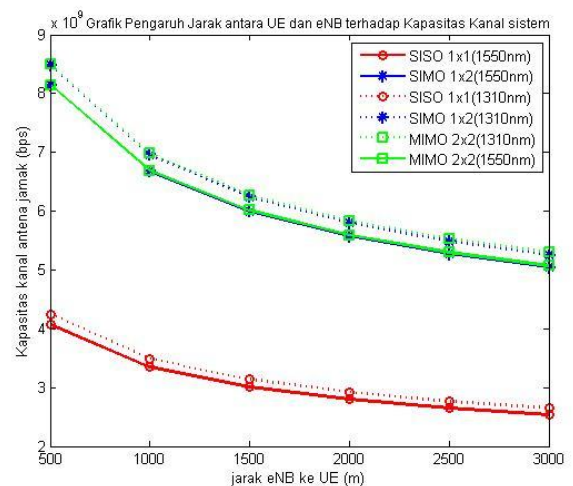


Gambar 5. Grafik Pengaruh Penggunaan Teknik Antena Jamak terhadap SNR Sistem pada Jarak yang Berbeda untuk Panjang Gelombang 1550 nm dan 1310 nm

Gambar 5 menggambarkan bahwa semakin jauh jarak antara pemancar dan penerima maka nilai SNR sistem semakin turun. Contohnya untuk penggunaan MIMO 2x2 pada jarak UE dan enodeB 500 m nilai SNR = 26,001 dB dan jarak UE dan enodeB 3000 m nilai SNR=16,085 dB. Pada Jarak UE dan enodeB sama, SNR sistem saat digunakan panjang gelombang 1550 nm nilai SNR sistem lebih tinggi daripada saat digunakan panjang gelombang 1310 nm. Contohnya pada MIMO 2x2, saat panjang gelombang 1550 nm, nilai SNR sistem=26,001 dB dan saat panjang gelombang 1310 nm, nilai SNR sistem =23,687 dB. SNR sistem terbesar saat menggunakan antenna SIMO 1x2 = 52,002 dB pada jarak UE dan enodeB 500 m.

##### B. Analisis Kapasitas Kanal pada Radio over fiber dengan Penerapan MIMO-OFDMA

Perhitungan analisis kapasitas kanal sistem antenna jamak menggunakan teorema Shannon yang terdapat pada persamaan (6).



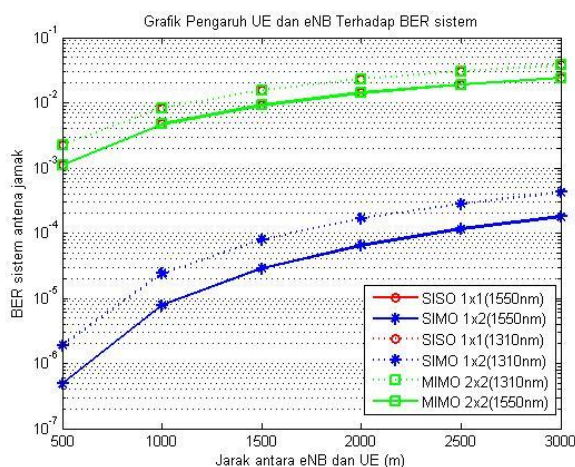
Gambar 6. Grafik Pengaruh Penggunaan Teknik Antena Jamak terhadap Kapasitas kanal Sistem pada Jarak yang Berbeda untuk Panjang Gelombang 1550 nm dan 1310 nm

Gambar 6 menjelaskan bahwa semakin jauh jarak antara UE dan enodeB maka nilai kapasitas kanal sistem semakin kecil. Contohnya pada MIMO 2x2, saat jarak UE dan eNB 500 m, kapasitas kanal sistem=8,149 Gbps dan

saat jarak UE dan eNB 3000 m kapasitas kanal sistem=5,072 Gbps. Kapasitas kanal sistem dipengaruhi oleh panjang gelombang, pada jarak yang sama penggunaan MIMO 2x2 saat digunakan panjang gelombang 1550 nm nilai kapasitas kanal sistem = 8,149 Gbps lebih kecil daripada saat digunakan panjang gelombang 1310 nm dengan nilai kapasitas kanal sistem=8,492 Gbps. Nilai kapasitas kanal sistem terbesar saat penggunaan antenna MIMO 2x2 dengan panjang gelombang 1310 nm dan jarak UE dan eNodeB 500 m sebesar 8,492 Gbps.

### C. Analisis Bit Error Rate (BER) pada Radio over fiber dengan Penerapan MIMO-OFDMA

Pada analisis ini dihitung nilai BER dengan teknik modulasi 64-QAM berdasarkan persamaan (8), yang sebelumnya dilakukan perhitungan Eb/No pada persamaan (7).

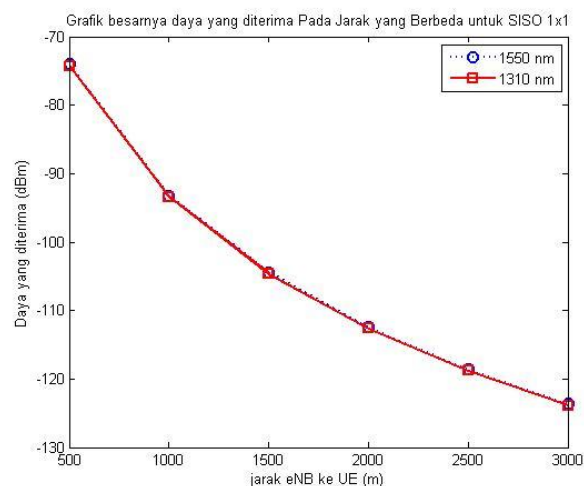


**Gambar 7.** Grafik Pengaruh Penggunaan Teknik Antena Jamak Terhadap BER Sistem pada Jarak yang Berbeda untuk Panjang Gelombang 1550 nm dan 1310 nm

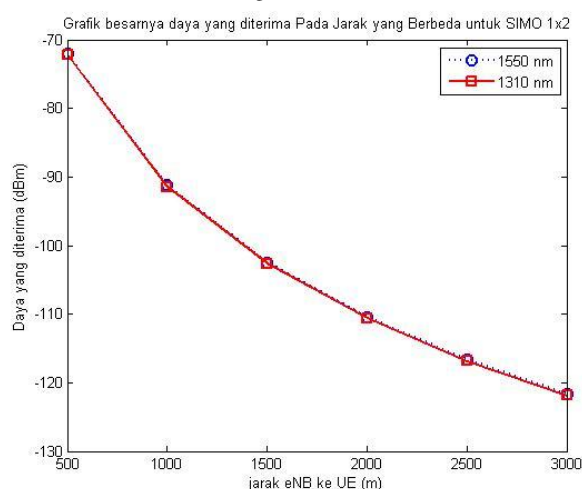
**Gambar 7** menjelaskan bahwa Semakin jauh jarak antara UE dan eNB maka nilai BER sistem akan semakin meningkat. Contoh pada penggunaan MIMO 2x2, jarak UE dan eNB 500 m nilai BER sistem=0,0012 dan untuk jarak UE dan eNB 3000 m nilai BER sistem=0,0252. BER dipengaruhi oleh panjang gelombang yang digunakan. Pada MIMO 2x2 saat digunakan panjang gelombang 1550 nm nilai BER sistem=0,0012 dan saat digunakan panjang gelombang 1310 nm nilai BER sistem=0,0025. Nilai BER yang paling baik yaitu pada penggunaan SIMO 1x2 dengan jarak UE dan eNB 500 m dan panjang gelombang 1550 nm sebesar  $6 \times 10^{-7}$ .

### D. Analisis Link Power Budget pada Radio over fiber dengan Penerapan MIMO-OFDMA

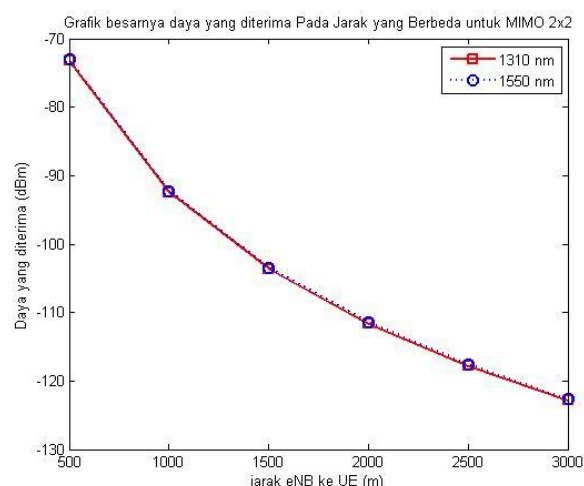
Perhitungan *Link Power Budget* pada *radio over fiber* terdiri dari perhitungan di kanal serat optik dan nirkabel, parameter ini untuk mengetahui berapa daya yang dapat diterima di sisi pengguna. Adapun hasil simulasi dan analisisnya sebagai berikut:



**Gambar 8.** Grafik Pengaruh Penggunaan Teknik Antena SISO 1x1 terhadap Daya yang Diterima pada Jarak yang Berbeda untuk Panjang Gelombang 1310 nm dan 1550 nm



**Gambar 9.** Grafik Pengaruh Penggunaan Teknik Antena SIMO 1x2 terhadap Daya yang Diterima pada Jarak yang Berbeda untuk Panjang Gelombang 1310 nm dan 1550 nm



**Gambar 10.** Grafik Pengaruh Penggunaan Teknik Antena MIMO 2x2 terhadap Daya yang Diterima pada Jarak yang Berbeda untuk Panjang Gelombang 1310 nm dan 1550 nm

**Gambar 8, 9, dan 10** menjelaskan semakin jauh jarak UE dan eNB maka daya yang diterima di sisi UE semakin kecil. Contohnya pada penggunaan MIMO 2x2, jarak UE dan eNB 500 m daya yang diterima ( $P_{rx}$ )=-73,034 dBm



lebih besar daripada saat jarak UE dan eNB 3000 m daya yang diterima di sisi pengguna (Prx)=-122,64 dBm. Selain itu, nilai *Link Power Budget* dipengaruhi oleh panjang gelombang. Pada jarak yang sama saat digunakan panjang gelombang 1550 nm daya yang diterima di pengguna lebih besar daripada saat digunakan panjang gelombang 1310 nm. Contohnya pada MIMO 2x2, untuk jarak UE dan eNB 500 m saat digunakan panjang gelombang 1550 nm Prx = -73,034dBm lebih besar daripada digunakan panjang gelombang 1310 nm dimana Prx = -72,234 dBm.

## V. PENUTUP

### A. KESIMPULAN

Dari analisis perhitungan MIMO 2x2, SIMO 1x2 dan SISO 1x1 OFDMA dengan 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 :
  - 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 antenna jamak saat jarak antara UE dan enodeB 500 m dan panjang gelombang 1550 nm, untuk penggunaan antenna 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 lebih kecil daripada saat menggunakan panjang gelombang 1310 nm. Hal ini dikarenakan *bandwidth* sistem pada saluran optik saat digunakan panjang gelombang 1310 nm lebih besar yaitu 539,16 MHz daripada saat panjang gelombang 1550 nm yaitu 471,51 MHz.
  - c. Nilai kapasitas kanal sistem tertinggi antenna jamak saat jarak antara UE dan enodeB 500 m dan panjang gelombang 1310 nm, untuk antenna 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.
  - 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 antenna jamak saat jarak antara UE dan enodeB 500 m dan panjang gelombang 1550 nm, untuk penggunaan antenna

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. Antena SIMO 1x2 menghasilkan performa terbaik pada parameter SNR dan BER namun tidak terjadi efisiensi *bandwidth* dikarenakan memiliki 1 antenna pemancar. Sedangkan MIMO 2x2 menghasilkan performa terbaik dalam hal kapasitas kanal sehingga terjadi efisiensi *bandwidth* karena memiliki 2 antenna pemancar. Oleh karena itu, MIMO 2x2 lebih optimal diaplikasikan pada teknologi *radio over fiber* pada jaringan LTE yang memiliki layanan dengan kapasitas yang besar serta *bandwidth* yang tinggi

### B. 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 antenna yang lebih banyak, misalnya MIMO 2x4 dan MIMO 4x4
2. Mensimulasikan penggunaan teknik antenna 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.

## VI. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ergen, Mustafa. 2009. *Mobile broadband including WiMAX and LTE*. United States : Springer.
- [2] Harjula, Ilkka et al. 2008. *Practical Issues in the Combining of MIMO Technique and RoF in OFDMA Systems*. UK : WSEAS Int.Conf on Electronics, Hardware, Wireless and Optical Communication Cambridge
- [3] Fernando, Xavier. 2009. *Radio over Fiber An Optical Technique for Wireless Access*. Ryerson University, Canada : IEEE Communications Society
- [4] Ali-Yahiya, Tara. 2011. *Understanding LTE and its Performance*. New York : Springer
- [5] Yang, Samuel C. 2010. *OFDMA System Analysis and Design*. Boston, London : Artech House
- [6] Restantia, Fidela. 2011. *Performansi MIMO OFDMA pada LTE*. Skripsi tidak dipublikasikan. Malang : Universitas Brawijaya
- [7] Al-Raweshidy, Hamed. 2010. *Optical Fiber Technologies and Radio over Fiber Strategic Research for Future Network*. London, Brunel University : eMobility Technology Platform
- [8] Fernando, Xavier dan Anpalagan, Alagan. 2004. *On The Design of Optical Fiber Based Wireless Access System*. Ryerson University, Canada : IEEE Communications Society
- [9] Hara, Shisuke, Ramjee Prasaad. 2003. *Multicarrier Technique for 4G mobile communications*. London : Artech House.
- [10] Raghavendra, M.V et al. 2010. Estimation of Optical Link Length for Multi Haul Applications. IJEST Vol. 2(6), 1485-1491