

PERFORMANSI SINGLE CARRIER FREQUENCY DIVISION MULTIPLE ACCESS PADA TEKNOLOGI RADIO OVER FIBER

Y. Reza Angga Sukma¹, Erfan Achmad Dahlan², Onny Setyawati.³

Abstrak— *Radio over Fiber (RoF)* adalah teknologi penggabungan antara sistem kabel dan nirkabel, dimana sisi nirkabel terletak pada pengiriman sinyal radio dari *base station*, sedangkan kabel terletak pada pengirimannya melalui serat optik. Makalah ini membahas performansi dari pengaplikasian *Single Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA)* pada teknologi RoF pada jaringan *mobile Long Term Evolution (LTE)* di sisi *uplink*. Performansi yang diamati pada penelitian ini adalah *signal to noise ratio (SNR)*, kapasitas kanal, *bit rate* dan *bit error rate (BER)* dengan berdasarkan perubahan variabel bebas yaitu perubahan teknik modulasi, perubahan panjang gelombang, perubahan panjang serat optik atau jarak transmisi dan perubahan jenis *cyclic prefix (CP)* yang digunakan. Dari hasil perhitungan diketahui bahwa panjang serat optik berbanding terbalik dengan nilai SNR sistem, kapasitas kanal dan *bit rate* tetapi berbanding terbalik dengan nilai BER sistem. Panjang gelombang 1550nm lebih baik dibandingkan panjang gelombang 1490nm dan 1310nm dalam perhitungan SNR sistem dengan nilai terbaiknya sebesar 34,4036 dB, kapasitas kanal dan BER tetapi panjang gelombang 1310nm lebih unggul dalam perhitungan *bit rate* dari λ 1550nm dan 1490nm yaitu dengan nilai terbaiknya sebesar 25,5515 Gbps. Penggunaan CP 0,2 lebih baik daripada CP 0,0729 dalam perhitungan SNR sistem dan kapasitas kanal dengan nilai terbaiknya masing-masing sebesar 34,4036 dB dan 319,29 Gbps, tetapi dalam perhitungan BER sistem CP 0,0729 sedikit lebih baik dengan nilai terbaiknya sebesar $1,97 \times 10^{-12}$. Teknik modulasi 64-QAM menunjukkan performansi terbaik dalam perhitungan SNR sistem, kapasitas kanal maupun BER sistem dibandingkan teknik modulasi 16-QAM atau QPSK.

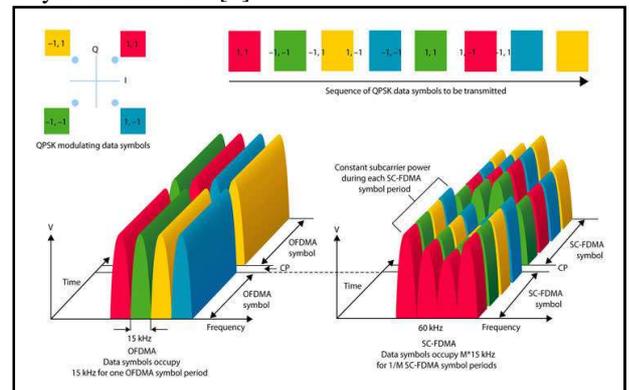
Kata Kunci— SC-FDMA, RoF, performansi, SNR, Kapasitas kanal, *bit rate*, BER.

I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi telekomunikasi dapat dikatakan paling pesat dibandingkan dengan isu-isu lainnya di zaman ini. Salah satunya yang paling sering dikembangkan adalah *mobile telecommunication* atau nirkabel karena kepraktisan dan fleksibilitasnya. Generasi terbarunya adalah 4G atau sering disebut *Long Term Evolution (LTE)*. LTE adalah teknologi nirkabel keluaran terbaru 3GPP yang fokus pada *wireless*

broadband dengan kecepatan akses secara teoritis 100 Mbps pada sisi *downlink* dan 50 Mbps pada sisi *uplink*. LTE menggunakan dua jenis teknik *multiple access* yaitu *Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA)* dengan *cyclic prefix* untuk sisi *downlink* dan *Single Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA)* dengan *cyclic prefix* untuk sisi *uplink* [1][7]. Kedua teknik *multiple access* yang digunakan memberikan keorthogonalan antar *user*, mengurangi interferensi, serta mampu meningkatkan kapasitas kanal. Kekurangan dari teknologi ini adalah daerah cakupannya yang terbatas.

Sistem SC-FDMA dianggap sebagai sistem OFDMA yang ditambahkan operasi DFT, dimana simbol data dalam domain waktu ditransformasi ke domain frekuensi dengan menggunakan operasi DFT. Ortogonalitas dari *user*nya yaitu setiap *user* ditempatkan pada *subcarrier* yang berbeda dalam domain frekuensi. Dalam OFDMA juga berlaku sistem ortogonalitas seperti diatas. Karena dalam SC-FDMA transmisi sinyal secara keseluruhan merupakan *single carrier signal*, *Peak-to-Average Power Ratio (PAPR)* lebih rendah jika dibandingkan dengan OFDMA yang menghasilkan sinyal *multicarrier* [3].



Gambar 1. Perbandingan Transmisi Simbol data QPSK pada OFDMA dan SC-FDMA [3].

Setelah dilakukan penransmisiian sinyal, setiap pelanggan harus dapat dipisahkan pada sisi penerima, tetapi pada kenyataannya proses ini tidak mudah karena propagasi gelombang di udara yang banyak menimbulkan masalah, seperti adanya pengaruh kanal multipath yang dapat menyebabkan terjadinya *inter-symbol interference (ISI)*. Oleh karena itu, pada setiap simbol SC-FDMA ditambahkan CP untuk menghindari terjadinya ISI. CP diperoleh dari menyalin bagian akhir dari tiap simbol dan kemudian akan diletakkan pada bagian awal simbol. CP bertindak sebagai *guard interval* diantara simbol yang berdekatan, apabila panjang dari *guard interval* yang dialokasikan lebih besar daripada

¹ Y. Reza Angga Sukma adalah mahasiswa Teknik Elektro Universitas Brawijaya; email: rezaangga92@gmail.com

² Ir. Erfan Achmad Dahlan, MT. adalah staf pengajar Teknik Elektro Universitas Brawijaya

³ Dr-Ing. Onny Setyawati, ST., MT., M.Sc. adalah staf pengajar Teknik Elektro Universitas Brawijaya

maksimum *delay spread* pada kanal ($T_{cp} \geq \tau_{max}$), maka tidak akan terjadi ISI. Maksimum *delay spread* didapat dari selisih *delay* antara panjang sinyal *path* yang terpanjang dan terpendek.[4]

Sedangkan media lain yaitu teknologi kabel, contohnya serat optik dapat menjangkau jarak yang cukup jauh maupun dalam gedung tetapi apabila perancangan kabel terlalu jauh dapat menyebabkan noise dan rugi-rugi yang besar pula saat transmisi data. Memberikan solusi dari permasalahan tersebut, muncul teknologi yang dikembangkan yaitu merupakan *integras* antara nirkabel dan kabel dalam satu infrastruktur yaitu teknologi *Radio over Fiber* (RoF).

Permintaan kebutuhan *data rate* yang tinggi serta tuntutan *broadband* yang terus meningkat beberapa tahun terakhir ini, menjadikan teknologi RoF kandidat yang menjanjikan untuk jaringan nirkabel maupun kabel. Tingginya biaya yang diperlukan apabila penggunaan dua teknologi ini secara terpisah memerlukan integritas untuk menyatukan dua jaringan ini dalam satu infrastruktur [5].

Perhatian utamanya adalah mengirimkan kedua sinyal frekuensi baik *radio frequency* (RF) dan *base band* (BB) pada panjang gelombang tunggal melalui serat tunggal dengan cara yang hemat biaya dan performansi yang tangguh [6].

Pada RoF, sinar laser dimodulasi oleh sinyal radio dan dikirimkan melalui media serat optik. Modulasi ini bersifat analog karena sinyal kariernya adalah sinyal analog. Konfigurasi dasar dari jalur serat optik analog terdiri dari *interface bidirectional*, yaitu *transmitter* laser analog serta penerima *photodiode* yang terletak pada *base station* atau *remote antenna unit*, yang dipasangkan dengan *transmitter* laser analog serta penerima *photodiode* yang terletak pada *radio processing unit*. Satu atau lebih serat optik menghubungkan RAU dengan sentral. Jumlah *base station* (BS) dan *remote antenna unit* dapat dikurangi untuk mendapatkan daya yang lebih rendah serta *bandwidth* yang lebih lebar. Maka dari itu, integrasi antara nirkabel serta jaringan optik menjadi solusi untuk mengurangi biaya pengiriman suara dan data, sementara menaikkan kapasitas jaringan [2].

Pada penelitian ini akan dianalisis performansi SC-FDMA pada teknologi RoF dengan parameter-parameter yang diamati adalah SNR sistem, kapasitas kanal, *bit rate* dan BER sistem dengan ruang lingkup:

1. Standarisasi teknologi LTE yang digunakan mengacu pada 3GPP release 8.
2. Media transmisi yang digunakan adalah serat optik *single mode*.
3. Analisis data dilakukan dengan menggunakan software Matlab 7.5.0.342 (R2007b).
4. Performansi yang diukur adalah performansi uplink dari user melalui *radio access point* atau *radio access unit* (RAP)/(RAU) selanjutnya melalui fiber dan menuju BTS utama.

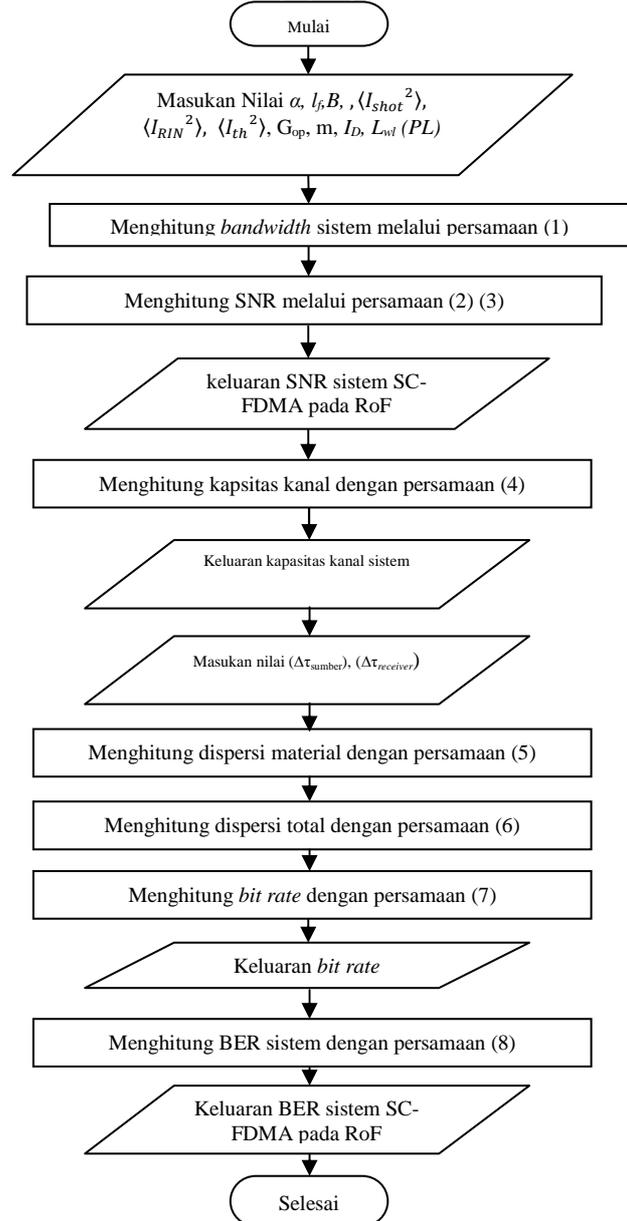
II. METODOLOGI PENELITIAN

Kajian yang digunakan dalam penelitian ini adalah kajian yang bersifat analisis terhadap performansi SC-FDMA terhadap teknologi RoF yang didasarkan pada studi literatur.. Transmisi data dilakukan pada sisi *uplink*. Susunan langkah yang akan dilakukan untuk

mendapatkan solusi dari permasalahan dalam penelitian ini, yaitu studi literatur, pengambilan data, perhitungan dan analisis data, serta pengambilan kesimpulan dan saran.

Data skunder yang yang digunakan mencakup konsep dasar RoF dan SC-FDMA, parameter teknologinya pada LTE release 8, serta parameter pengaplikasian SC-FDMA pada RoF.

Metode perhitungan dan analisis data yang digunakan dalam penelitian ini adalah mengumpulkan beberapa nilai parameter dari data sekunder sesuai dengan standar LTE yang kemudian diolah dalam rumus-rumus menggunakan bantuan *software* matlab 7.5.0.342 (R2007b). Berikut ini langkah-langkah perhitungan untuk mendapatkan kinerja yang diinginkan:



Gambar 2. Diagram Alir Perhitungan Kinerja Sistem

a. Kanal noise pada RoF

Sebelum menghitung *noise* pada sistem ini, perlu dicari nilai *bandwidth* sistem terlebih dahulu menggunakan persamaan (Hara, 2003) :

$$B_{sistem} = \frac{R_{tot} [2 \cdot (1 - \alpha_{CP}) + N - 1]}{(1 - \alpha_{CP}) \cdot N \cdot \log_2(M)} \quad (1)$$

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

T_s = durasi simbol SC-FDMA (s)

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

T_{cp} = durasi *cyclic prefix* (s)

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

M = jumlah kemungkinan sinyal

N = jumlah *subcarrier*

α_{cp} = faktor *cyclic prefix*

b. *Signal to Ratio* (SNR)

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

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

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_{wt} = rugi-rugi propagasi (PL)

G_{op} = gain *amplifier* optik

$$SNR_{sistem} (dB) = 10 \log_{10} SNR \quad (3)$$

c. Kapasitas kanal sistem

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

$$C = B_{sistem} \cdot \log_2 (1 + SNR_{sistem}) \quad (4)$$

dengan :

C = kapasitas kanal sistem (bps)

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

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

d. Dispersi

Dispersi serat optik *single mode* yang terjadi RoF adalah dispersi bahan. Dispersi material disebabkan oleh variasi indeks bias dengan panjang gelombang untuk serat (Mohamed, et al., 2011)

$$\tau_m = \Delta\lambda \cdot l \cdot D_m \quad (5)$$

τ_m = dispersi bahan (ps)

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

D_m = koefisien dispersi bahan (ps/nm.km)

l = panjang serat optik (km)

a. *Bit rate*

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

$$\Delta\tau_{sistem} = \sqrt{(\Delta\tau_{sumber})^2 + (\Delta\tau_{receiver})^2 + (\Delta\tau_{mat})^2} \quad (6)$$

$$B_{R(NRZ)} = \frac{0.7}{\Delta\tau_{sistem}} \quad (7)$$

dengan:

L = panjang serat optik

c = kecepatan cahaya

$\Delta\lambda$ = lebar spectral sumber optik

λ = panjang gelombang yang digunakan

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

$\Delta\tau$ = *disperse*

g. *Bit Error Rate* (BER)

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

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{SNR_{sistem}} \right) \quad (8)$$

dengan :

BER = *bit error rate* sistem

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

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

III. PEMBAHASAN DAN HASIL

Bab ini membahas dan menganalisis perhitungan mengenai performansi SC-FDMA pada teknologi RoF. Analisis yang akan dilakukan meliputi parameter *Signal to Noise Ratio* (SNR), kapasitas kanal, *bit rate* dan *Bit Error Rate* (BER). variabel bebas yang digunakan untuk perhitungan dalam penelitian yaitu panjang serat optik (25 km – 50 km), teknik modulasi (QPSK, 16-QAM dan 64-QAM), jenis *cyclic prefix* (*short dan long/extended*) dan yang terakhir adalah panjang gelombang (1330nm, 1490nm dan 1550nm).

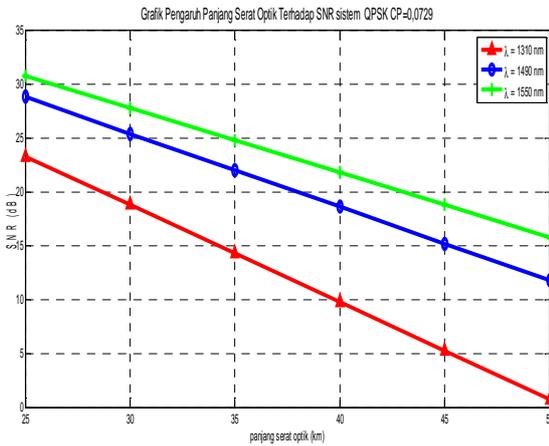
Jaringan LTE telah menggunakan *Single Carrier Frequency Division Multiple Access* (SC-FDMA) pada kanal *uplink*. Pada penelitian ini, transmisi data dilakukan pada sisi *uplink*, dan pada kanal *bandwidth* 10 MHz.

Hasil perhitungan, analisis, dan pembahasan diuraikan sebagai berikut :

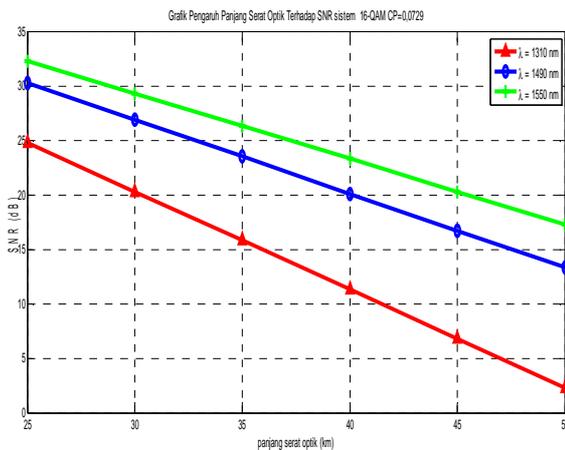
A. Analisis *Signal to Ratio* (SNR) Teknologi RoF pada SC-FDMA

SNR adalah perbandingan sinyal yang diterima di sisi *receiver* dengan *noise* dan rugi-rugi total di seluruh sistem. Di sub bab ini, pada analisis SNR digunakan spesifikasi *mobile* LTE standar 3GPP *release* 8. Selain itu juga digunakan spesifikasi RoF.

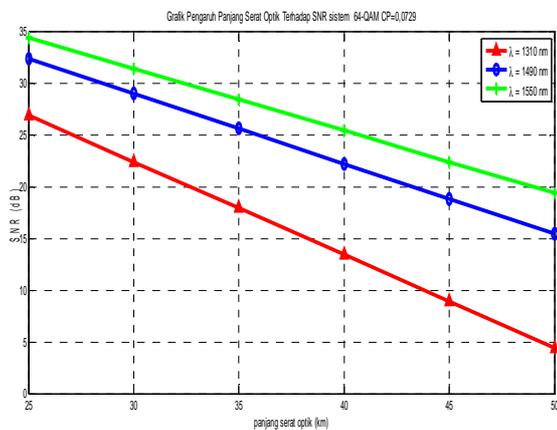
Kanal *noise* yang digunakan dalam menghitung SNR terdiri atas kanal optik dan kanal *wireless*. Kanal *wireless* terdiri dari *noise* AWGN dan rugi-rugi propagasi ruang bebas. Perhitungan SNR sistem ini akan digunakan tiga teknik modulasi yaitu QPSK, 16-QAM dan 64-QAM sebagai salah satu variabel bebas untuk mencari nilai parameter SNR. Selain itu juga digunakan dua jenis CP yang dibedakan dan tiga jenis panjang gelombang pada tiap teknik modulasi yang berbeda.



Gambar 3. Grafik hubungan panjang serat optik dengan SNR dengan CP = 0,0729 teknik modulasi QPSK



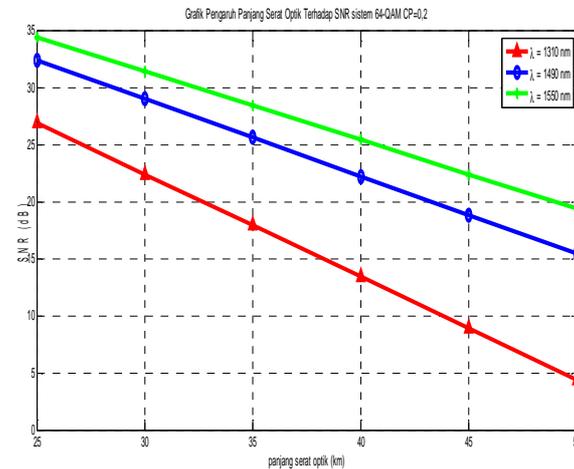
Gambar 4. Grafik hubungan panjang serat optik dengan SNR dengan CP = 0,0729 teknik modulasi 16-QAM



Gambar 5. Grafik hubungan panjang serat optik dengan SNR dengan CP = 0,0729 teknik modulasi 64-QAM

Pada Gambar 3, 4 ataupun 5 menunjukkan bahwa pada tiga teknik modulasi yang digunakan di sistem ini, panjang serat optik berbanding terbalik dengan nilai SNR sistem, hal ini terjadi karena rugi-rugi yang terjadi dalam proses transmisi semakin besar. Selain itu, pada panjang serat optik yang sama, nilai SNR sistem untuk panjang gelombang 1550 nm lebih unggul dibandingkan dengan panjang gelombang 1490 nm dan 1310 nm karena nilai L_{op} yang dihasilkan λ 1550 nm paling besar diantara dua λ lainnya sesuai dengan persamaan rugi-rugi optik L_{op} .

Untuk analisis perubahan nilai yang disebabkan oleh penggunaan CP *short* dan *extended* akan diambil salah satu contoh grafik pada gambar 6 yaitu pada 64-QAM Meskipun perbedaan nilainya sangat tipis, tetapi dapat diketahui nilainya bila dibandingkan dengan gambar 5, penggunaan CP *extended* 0,2 memiliki nilai lebih baik dibandingkan CP 0,0729. Pada panjang serat optik yang sama misalnya 25 km dan panjang gelombang 1550 nm nilai SNR sistem untuk CP = 0,0729 didapatkan sebesar 19,4019 dB sedangkan pada CP = 0,2 didapatkan nilai 19,4036 dB.

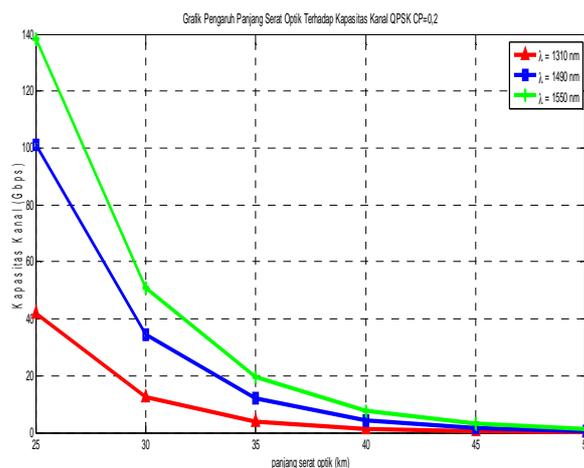


Gambar 6. Grafik hubungan panjang serat optik dengan SNR dengan CP = 0,2 teknik modulasi 64-QAM

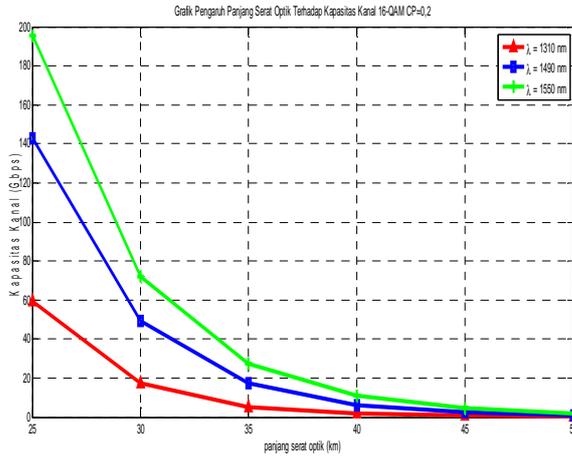
Dari ketiga teknik modulasi yang digunakan, nilai SNR terbaik ialah pada teknik modulasi 64-QAM yaitu dengan nilai maksimal sebesar 34,4036 dB di panjang gelombang 1550 nm dan jarak 25 km serta CP yang digunakan adalah 0,2.

B. Analisis Kapasitas Kanal Serat Optik Teknologi RoF pada SC-FDMA

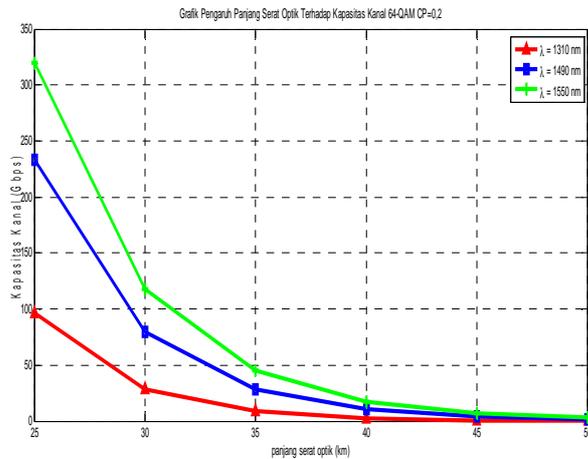
Dalam perhitungan kapasitas kanal sistem diperlukan nilai SNR sistem yang sudah dihitung sebelumnya. Perhitungannya menggunakan rumus (4).



Gambar 7. Grafik hubungan kapasitas kanal terhadap panjang serat optik dengan CP = 0,2 pada teknik modulasi QPSK



Gambar 8. Grafik hubungan kapasitas kanal terhadap panjang serat optik dengan CP = 0,2 pada teknik modulasi 16-QAM



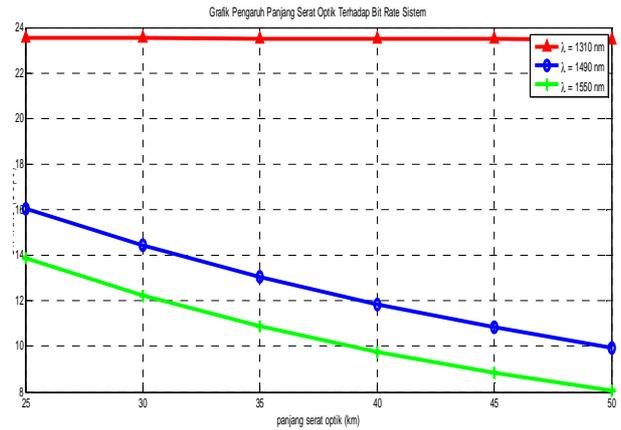
Gambar 9. Grafik hubungan kapasitas kanal terhadap panjang serat optik dengan CP = 0,2 pada teknik modulasi 64-QAM

Gambar 7, 8 dan 9 menunjukkan bahwa nilai kapasitas kanal yang terbaik diantara tiga teknik modulasi yang digunakan adalah pada teknik modulasi 64-QAM. Terjadi demikian karena hasil perhitungan SNR_{sistem} pada teknik modulasi 64-QAM juga menunjukkan nilai yang terbaik sehingga nilai kapasitas kanalnya juga sama. Ditunjukkan pada grafik pula bahwa nilai kapasitas kanal berubah secara logaritmik terhadap panjang serat optik. Semakin besar panjang serat optik yang digunakan, nilai kapasitas sistem semakin kecil, karena nilai SNR sistem serta *bandwidth* untuk serat optiknya juga semakin kecil.

Sedangkan pada panjang serat optik sama, CP sama pada semua teknik modulasi yang digunakan didapatkan bahwa nilai kapasitas kanal sistem dengan panjang gelombang 1550 nm memiliki nilai lebih baik dibandingkan 1310 nm dan 1490 nm sebab pada panjang gelombang 1310 nm dan 1490 nm nilai SNR sistem lebih kecil akibat dari koefisien redaman optic yang lebih besar, tetapi *bandwidth* sistem lebih besar karena koefisien dispersi panjang gelombangnya lebih kecil.

Untuk pengaruh penggunaan CP diketahui dengan perbedaan nilai yang sangat tipis CP = 0,2 memiliki nilai yang lebih baik dibandingkan dengan CP = 0,0729.

C. Analisis Bit rate Kanal Optik Teknologi RoF pada SC-FDMA

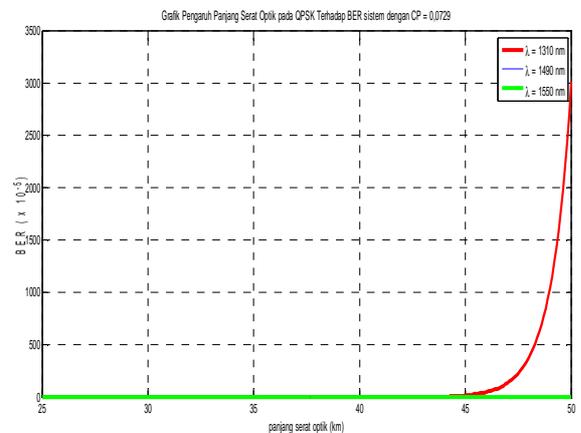


Gambar 10. Grafik hubungan bit rate terhadap panjang serat optik

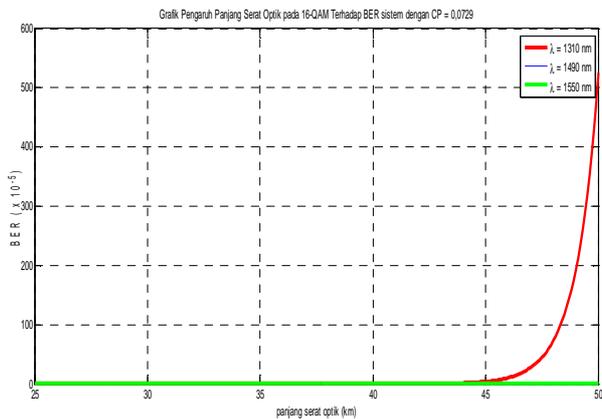
Gambar 10 menjelaskan hubungan antara panjang serat optik dengan bit rate pada kanal optik. Baik pada panjang gelombang 1310 nm, 1490 nm ataupun 1550 nm didapatkan bahwa panjang serat optik berbanding terbalik dengan nilai bit rate sistem kanal optik. Semakin pendek panjang serat optik yang digunakan maka nilai bit rate sistem semakin besar. Hal ini terjadi karena semakin pendek panjang serat optik yang digunakan maka semakin kecil pula nilai dispersi material suatu sistem sehingga nilai bit rate semakin besar.

D. Analisis Bit Error Rate (BER) Teknologi RoF pada SC-FDMA

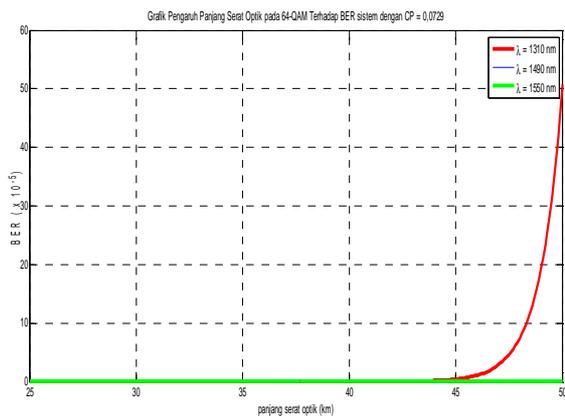
Bit Error Rate (BER) adalah perbandingan nilai bit yang salah saat proses transmisi berlangsung, dihitung di sisi receiver. BER diharapkan memiliki nilai yang sekecil mungkin agar diperoleh kualitas sinyal yang baik. Oleh karena itu, BER sistem tergantung pada ukuran kualitas sinyal (SNR_{sistem}) yang diterima. Dari gambar 11, 12 dan 13 dapat diketahui bahwa nilai BER sistem berbanding lurus dengan panjang serat optik, dengan kata lain semakin panjang serat optik maka nilai BER juga semakin besar pada ketiga teknik modulasi yang digunakan.



Gambar 11. Grafik hubungan BER terhadap panjang serat optik dengan CP = 0,0729 pada teknik modulasi QPSK



Gambar 12. Grafik hubungan BER terhadap panjang serat optik dengan CP = 0,0729 pada teknik modulasi 16-QAM



Gambar 13. Grafik hubungan BER terhadap panjang serat optik dengan CP = 0,0729 pada teknik modulasi 64-QAM

Berdasarkan **gambar 11, 12 dan 13** diketahui bahwa teknik modulasi 64-QAM menunjukkan performansi terbaiknya bila ditinjau dari nilai BER sistemnya. Nilai BER_{sistem} terbaik adalah $1,97 \times 10^{-12}$ untuk panjang gelombang 1550 nm dan panjang serat optik 25 km CP = 0,0729 dan teknik modulasi 64-QAM.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan perhitungan dan analisis yang telah dilakukan, dapat diketahui bahwa pada pengaplikasian teknologi RoF di jaringan SC-FDMA sisi uplink *mobile* LTE penggunaan teknik modulasi yang berbeda akan berpengaruh pada nilai SNR, kapasitas kanal dan BER sistem. Maka didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Pada ketiga teknik modulasi yang digunakan didapatkan nilai SNR sistem untuk panjang gelombang 1550 nm lebih tinggi dibandingkan SNR untuk panjang gelombang 1480 nm dan 1310 nm. Pada teknik modulasi 64-QAM nilai SNR_{sistem} tertinggi untuk panjang gelombang 1550 nm adalah 34,4036 dB sedangkan untuk panjang gelombang 1490 nm adalah 32,4036 dB dan pada panjang gelombang 1310 nm adalah 26,9036 dB.
2. Pada tiga teknik modulasi yang digunakan SNR_{sistem} memiliki performansi terbaik pada saat CP yang digunakan adalah 0,2 dibandingkan dengan CP = 0,0729 yaitu sebesar 34,4036 dB dan 34,4019 dB sebagai nilai tertingginya.
3. Pada tiga teknik modulasi yang digunakan, semakin panjang serat optik yang digunakan, nilai kapasitas

kanal semakin kecil. kapasitas kanal tertinggi adalah 319,29 Gbps pada panjang serat optik 25 km dengan CP = 0,2 teknik modulasi 64-QAM panjang gelombang 1550 nm, sedangkan nilai kapasitas kanal terendah adalah 1,27 Gbps yang terjadi saat panjang gelombang 1310 nm pada panjang serat optik 50 km teknik modulasi QPSK pada kedua CP yang digunakan.

4. Nilai rata-rata kapasitas kanal pada simulasi ini mencapai nilai terbaik pada saat teknik modulasi yang digunakan adalah 64-QAM dibandingkan dengan QPSK dan 16-QAM. Nilai maksimumnya adalah 319,29 Gbps.
5. Nilai BER_{sistem} akan semakin tinggi seiring dengan semakin panjang serat optik yang digunakan baik pada teknik modulasi QPSK, 16-QAM maupun 64-QAM. Nilai BER_{sistem} tertinggi pada simulasi ini adalah $1,64 \times 10^{-3}$ terjadi di panjang serat optik 35 km, CP = 0,2, panjang gelombang 1310 nm dan teknik modulasi QPSK. Dan nilai terendah BER_{sistem} adalah $1,97 \times 10^{-12}$ terjadi di panjang serat optik 25 km, CP = 0,0729, panjang gelombang 1550 nm dan teknik modulasi 64-QAM.
6. Nilai BER_{sistem} untuk panjang gelombang 1550 nm menunjukkan performa terbaik dibanding panjang gelombang 1490 nm dan 1310 nm karena nilai rata-ratanya terkecil dibandingkan dua lainnya, dengan nilai terbaiknya sebesar $1,97 \times 10^{-12}$.
7. Nilai rata-rata BER_{sistem} memiliki nilai rata-rata terbaik saat CP yang digunakan ialah 0,0729 di tiga teknik modulasi yang digunakan, meskipun perbedaannya relatif kecil dengan CP = 0,2 dengan nilai terbaiknya yaitu $1,97 \times 10^{-12}$.
8. Ditinjau dari rata-rata nilai BER_{sistem}nya teknik modulasi 64-QAM adalah yang paling bagus dibandingkan dengan QPSK dan 16-QAM. Dengan masing-masing nilai terbaiknya secara berurutan adalah $1,97 \times 10^{-12}$, $1,5 \times 10^{-11}$ dan 4×10^{-9} .

DAFTAR PUSTAKA

- [1] IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group. (2001, Jul.) Channel Models for Fixed Wireless Applications. [Online]. http://www.ieee802.org/16/tg3/contrib/802163c-01_29r4.pdf
- [2] Fernando, Xavier. 2009. Radio over Fiber-An Optical Technique for Wireless Access. IEEE Communications Society.
- [3] Holma, Harri and Antti Toskala. 2009. *LTE for UMTS - OFDMA and SCFDMA Based Radio Access*. UK: British Library
- [4] Hyung G. Myung. 2009. *Single Carrier FDMA a New Air interface for LTE*. New York : John Wiley & Sons, Inc.
- [5] 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.
- [6] Ng'oma, A. 2002. "Design of a Radio-over-Fibre System for Wireless LANs", Technische Universiteit Eindhoven
- [7] PT. IXIA. November 2009. *Single Carrier Frequency Division Multiple Access in LTE*. Calabasas. <http://www.ixia.com/>