

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Umum

Pada bab ini akan dibahas mengenai analisis performansi teknik modulasi pada jaringan WiMAX standar IEEE 802.16e untuk layanan *video conference*. Analisis yang dilakukan meliputi *Bit Error Rate (BER)*, *delay* dan *throughput* dengan menggunakan teknik modulasi adaptif yaitu BPSK, QPSK, 16 QAM, dan 64 QAM. Data sekunder yang digunakan antara lain berupa spesifikasi teknik *mobile WiMAX* yang didapat dari jurnal, buku referensi dan skripsi. Hasil analisis akan disimulasikan dengan menggunakan program Matlab 7.0.4.

4.2 Analisis penentuan jarak efektif untuk tiap modulasi pada jaringan *mobile WiMAX*

Sub-bab ini akan membahas mengenai bagaimana penentuan jarak coverage yang efektif untuk tiap modulasi yang digunakan pada jaringan *mobile WiMAX*. Parameter yang mempengaruhi jarak jangkauan antara *Base Station* dan *Subscriber Station* adalah rugi-rugi propagasi, *Receive Signal Level (RSL)*, *Receiver sensitivity (Rss)*. Analisis penentuan jarak efektif akan menggunakan spesifikasi jaringan *mobile WiMAX* yang dapat mempermudah proses perhitungan dan analisis. Berikut merupakan tabel spesifikasi *mobile WiMAX*:

Tabel 4.1 Spesifikasi *Mobile WiMAX*

Parameter	Value
Operating Frequency	2500 MHz
Duplex	TDD
Channel Bandwidth	10 MHz
BS Height	32 meters
Mobile Terminal Height	1.5 meters
BS Antenna Gain	15 dBi

Parameter	Value
MS Antenna Gain	-1 dBi
BS Maximum Power Amplifier Power	43 dBm
Mobile Terminal Maximum PA Power	23 dBm
BS Noise Figure	4 dB
MS Noise Figure	7 dB

(WiMAX Forum, 2006)

4.2.1 Penentuan rugi-rugi propagasi jaringan *mobile* WiMAX

Rugi-rugi propagasi yang terjadi antara pemancar dan penerima dapat terjadi seiring dengan bertambahnya jarak jangkauan *Base Station* dan *Subscriber Station* yang dapat mengakibatkan daya sinyal yang diterima oleh penerima semakin kecil. *Path loss* dapat terjadi dikarenakan kondisi *non-line of sight* (NLOS). Kondisi NLOS merupakan kondisi dimana terdapat banyak penghalang sinyal seperti bangunan, pohon yang terletak diantara *transmitter* dan *receiver*. Penghalang sinyal menyebabkan sinyal yang telah dikirim mengalami pemantulan, difraksi maupun *scattering* sehingga sinyal tersebut memiliki lebih dari satu jalur dari pemancar ke penerima.

Terdapat berbagai macam metode yang digunakan untuk menghitung rugi-rugi propagasi dalam kondisi NLOS. Salah satunya adalah dengan menggunakan model *Stanford University Interim* (SUI). Metode SUI dapat diaplikasikan untuk menghitung rugi-rugi propagasi pada jaringan *mobile* WiMAX 2.5 GHz yang digunakan dalam penelitian ini. Parameter yang dibutuhkan untuk menghitung rugi-rugi propagasi dengan metode SUI adalah menggunakan standar IEEE 802.16e. Wilayah yang dianalisis meliputi wilayah dengan klasifikasi lingkungan suatu lintasan gelombang radio berdasarkan halangan dan tingkat kepadatan yaitu halangan wilayah urban, sub urban dan rural.

Wilayah urban merupakan wilayah dengan tingkat kepadatan dan halangan yang tinggi yang menyebabkan sinyal radio dalam perambatannya mengalami pantulan dengan redaman tertentu. Halangan tersebut dapat berupa gedung-gedung yang tinggi serta memiliki kerangka logam dan beton yang tebal, sehingga membatasi propagasi

radio melalui gedung. Pada wilayah urban juga terdapat banyak terdapat kendaraan yang bergerak, sehingga menyebabkan perubahan karakteristik kanal secara kontinyu. Wilayah sub urban merupakan wilayah dengan tingkat kepadatan dan halangan yang lebih rendah dibandingkan dengan wilayah urban tetapi mempunyai kecepatan pergerakan kendaraan lebih tinggi . Wilayah ini memiliki gedung-gedung yang relatif rendah, sehingga sinyal radio mengalami difraksi oleh puncak gedung. Wilayah rural adalah wilayah yang jarang terdapat halangan, sehingga kuat sinyal yang diterima akan lebih besar dibanding daerah urban atau sub – urban.

Jarak antara BS dan SS yang digunakan pada tiga wilayah yang berbeda, berada dalam rentang 2000 m hingga 20000 m. Nilai rugi-rugi propagasi dapat dihitung menggunakan persamaan empirik model SUI yaitu:

$$P_L = A + 10\gamma \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_f + X_{h_{CPE}} + s$$

dengan,

a) Mencari nilai A (*free space loss*), menggunakan perumusan:

$$A = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d_0}{\lambda} \right), \text{ karena } \lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{2500 \times 10^6} = 0.12, \text{ maka}$$

$$A = 20 \log_{10} \left(\frac{4 \times 3.14 \times 100}{0.12} \right) = 80.396$$

b) Mencari nilai γ didapat dari persamaan $\gamma = a - b \times h_b + \left(\frac{c}{h_b} \right)$, dimana nilai a, b dan c merupakan konstanta yang menunjukkan kategori *terrain*, sedangkan nilai h_b merupakan tinggi *Base Station* yaitu 32 meter, sehingga didapat nilai γ pada wilayah urban 4.7, wilayah suburban 4.3264 dan wilayah rural 4.065.

c) Mencari nilai X_f , menggunakan persamaan:

$$X_f = 6 \log \left(\frac{f}{1900} \right) = 6 \log \left(\frac{2500}{1900} \right) = 0.715$$

d) Mencari $X_{h_{CPE}}$ didapat dari perumusan berikut:

Untuk terrain A dan B (wilayah urban dan suburban),

$$X_{h_{CPE}} = -10.8 \log \left(\frac{h_{CPE}}{2} \right) = -10.8 \log \left(\frac{1.5}{2} \right) = 1.3493$$

Untuk terrain C (wilayah rural),

$$X_{h_{CPE}} = -20 \log\left(\frac{h_{CPE}}{2}\right) = -20 \log\left(\frac{1.5}{2}\right) = 2.4987$$

e) Nilai s merupakan representasi *shadowing* oleh pohon atau bangunan yang harganya adalah 10.6 dB.

Setelah mendapatkan nilai parameter yang diperlukan dalam perhitungan rugi-rugi propagasi, maka didapatkan nilai rugi-rugi propagasi, yaitu:

$$\begin{aligned} P_L &= 80.396 + 10 \times \gamma \times \log_{10}\left(\frac{d}{100}\right) + 0.715 + 1.3493 + 10.6 \\ &= 93.0603 + 10\gamma(\log_{10}d - \log_{10}100) \\ &= 93.0603 + 10\gamma \log_{10}d - 10\gamma(2) \end{aligned}$$

Sehingga nilai rugi-rugi propagasi dengan variasi jarak jangkauan BS dan SS pada wilayah yang berbeda, yaitu:

1. Wilayah Urban

Untuk $d = 2000$ m,

$$\begin{aligned} P_L &= 80.396 + 10 \times \gamma \times \log_{10}\left(\frac{d}{100}\right) + 0.715 + 1.3493 + 10.6 \\ &= 93.0603 + 10\gamma(\log_{10}d - \log_{10}100) \\ &= 93.0603 + 10\gamma \log_{10}d - 10\gamma(2) \\ &= 93.0603 + 10 \times 4.7 \times \log_{10}2000 - 10 \times 4.7 \times 2 \\ &= 47 \log_{10} 2000 - 0.9397 \\ &= 154.2073\text{dB} \end{aligned}$$

Tabel 4.2 Hasil perhitungan rugi-rugi propagasi untuk wilayah urban

Jarak BS-SS (m)	Rugi-rugi propagasi (dB)
2000	154.2073
4000	168.3543
6000	176.6263
8000	182.5013
10000	187.0603
12000	190.7733

Jarak BS-SS (m)	Rugi-rugi propagasi (dB)
14000	193.9223
16000	196.6483
18000	199.0453
20000	201.2073

(Sumber: Perhitungan)

2. Wilayah Suburban

Untuk $d = 2000$ m,

$$\begin{aligned}
 P_L &= 80.396 + 10 \times \gamma \times \log_{10} \left(\frac{d}{100} \right) + 0.715 + 1.3493 + 10.6 \\
 &= 93.0603 + 10\gamma(\log_{10}d - \log_{10}100) \\
 &= 93.0603 + 10\gamma\log_{10}d - 10\gamma(2) \\
 &= 93.0603 + 10 \times 4.3264 \times \log_{10}2000 - 10 \times 4.3264 \times 2 \\
 &= 43.264 \log_{10}2000 + 6.5323 \\
 &= 149.3468 \text{ dB}
 \end{aligned}$$

Tabel 4.3 Hasil perhitungan rugi-rugi propagasi untuk wilayah suburban

Jarak BS-SS (m)	Rugi-rugi propagasi (dB)
2000	149.3468
4000	162.3692
6000	169.9837
8000	175.3917
10000	179.5883
12000	183.0062
14000	185.9048
16000	188.4142
18000	190.6206
20000	192.6108

(Sumber: Perhitungan)

3. Wilayah Rural

Untuk $d = 2000$ m,

$$\begin{aligned}
 P_L &= 80.396 + 10 \times \gamma \times \log_{10} \left(\frac{d}{100} \right) + 0.715 + 1.3493 + 10.6 \\
 &= 93.0603 + 10\gamma(\log_{10}d - \log_{10}100) \\
 &= 93.0603 + 10\gamma\log_{10}d - 10\gamma(2) \\
 &= 93.0603 + 10 \times 4.065 \times \log_{10}2000 - 10 \times 4.065 \times 2 \\
 &= 40.65\log_{10}2000 + 11.7603 \\
 &= 147.0954 \text{ dB}
 \end{aligned}$$

Tabel 4.4 Hasil perhitungan rugi-rugi propagasi untuk wilayah rural

Jarak BS-SS (m)	Rugi-rugi propagasi (dB)
2000	147.0954
4000	159.331
6000	166.4854
8000	171.5667
10000	175.5097
12000	178.7211
14000	181.4446
16000	183.8023
18000	185.8755
20000	187.7454

(Sumber: Perhitungan)

Dari perhitungan jarak efektif tiap modulasi pada wilayah urban, suburban maupun rural, didapat bahwa semakin jauh jarak antara *base station* dan *subscriber station* maka nilai rugi-rugi propagasi akan semakin besar pula.

4.2.2 Penentuan Receive Signal Level (RSL)

Receive Signal Level (RSL) merupakan besarnya sinyal yang diterima oleh penerima. Dengan nilai penguatan antenna pemancar (G_{rx}) sebesar -1 dBi, nilai rugi-

rugi pemancar (L_{rx}) 2dB, EIRP sebesar 57.3 dBm = 27.3 dB sesuai dengan spesifikasi mobile WiMAX dan $L_{propagasi}$ yang telah dihitung sebelumnya, maka perhitungan RSL adalah sebagai berikut:

1) Wilayah Urban

Pada jarak 2000 m, $RSL = 27.3 - 154.2073 + (-1) - 2 = -129.907dB$

Tabel 4.5 Hasil perhitungan *Receive Signal Level* (RSL) untuk wilayah urban

Jarak BS-SS (m)	RSL (dB)
2000	-129.907
4000	-144.054
6000	-152.326
8000	-158.201
10000	-162.76
12000	-166.473
14000	-169.622
16000	-172.348
18000	-174.745
20000	-176.907

(Sumber: Perhitungan)

2) Wilayah Suburban

Pada jarak 2000 m, $RSL = 27.3 - 149.3468 + (-1) - 4 = -125.047dB$

Tabel 4.6 Hasil perhitungan *Receive Signal Level* (RSL) untuk wilayah suburban

Jarak BS-SS (m)	RSL (dB)
2000	-125.047
4000	-138.069
6000	-145.684
8000	-151.092
10000	-155.288
12000	-158.706

Jarak BS-SS (m)	RSL (dB)
14000	-161.605
16000	-164.114
18000	-166.321
20000	-168.311

(Sumber: Perhitungan)

3) Wilayah Rural

Pada jarak 2000 m, $RSL = 57.3 - 147.0954 + (-1) - 4 = -122.795 \text{ dB}$

Tabel 4.7 Hasil perhitungan *Receive Signal Level* (RSL) untuk wilayah rural

Jarak BS-SS (m)	RSL (dB)
2000	-122.795
4000	-135.031
6000	-142.185
8000	-147.267
10000	-151.21
12000	-154.421
14000	-157.145
16000	-159.502
18000	-161.575
20000	-163.445

(Sumber: Perhitungan)

Dari hasil perhitungan *Receive Signal Level* (RSL) didapat bahwa semakin jauh jarak jangkauan antara BS dan SS, maka daya yang diterima juga semakin kecil. Pengklasifikasian wilayah juga menentukan daya yang diterima oleh *receiver*, wilayah yang memiliki tingkat penghalang yang tinggi seperti kategori urban, memiliki daya terima yang lebih kecil dibandingkan dengan wilayah yang tingkat keberadaan penghalangnya rendah yaitu wilayah suburban maupun rural.

4.2.3 Penentuan Receiver Sensitivity (Rss)

Receiver Sensitivity (Rss) digunakan untuk mengetahui besarnya tingkat kepekaan sebuah perangkat di sisi penerima. Rss dipengaruhi oleh nilai *Signal to Noise Ratio* (SNR) penerima yang didapat dari standar spesifikasi *mobile WiMAX* pada tabel 4.8 berikut ini:

Tabel 4.8 Receiver SNR Standard IEEE 802.16e

Tipe Modulasi	Receiver SNR (dB)
BPSK $1/2$	6.4
QPSK $1/2$	9.4
QPSK $3/4$	11.2
16-QAM $1/2$	16.4
16-QAM $3/4$	18.2
64-QAM $2/3$	22.7
64-QAM $3/4$	24.4

(Sumber: Standard IEEE 802.16e)

Parameter OFDMA juga digunakan untuk menghitung besarnya RSS, parameter OFDM didapat dari standar *mobile WiMAX*, yaitu:

Tabel 4.9 Parameter OFDMA

Parameter	Value
System Channel Bandwidth (MHz)	10 MHz
Sampling Frequency (F_p in MHz)	11.2
FFT Size (N_{FFT})	1024
Used Size (N_{used})	841
Sampling Frequency (F_s)	$8/7 \times bandwidth$
Factor of Repetition (R)	6
Factor Of Sampling	28/25
Number of Sub-Channel	16
Sub-Carrier Frequency Spacing	10.94 kHz

(Sumber: WiMAX Forum, 2006)

Dengan memasukkan nilai SNR yang berbeda-beda untuk tiap modulasi yang bervariasi serta parameter OFDMA yang dibutuhkan dalam perhitungan dengan asumsi mengabaikan faktor *loss implementation*, maka nilai Rss adalah sebagai berikut:

Untuk modulasi BPSK $1/2$,

$$\begin{aligned}
 R_{ss} &= -144 + SNR_{RX} - 10\log R + 10 \log \left(F_s \cdot \frac{N_{used}}{N_{FFT}} \right) + loss_{imp} + N_F \\
 &= -144 + 6.4 - 10\log 6 + 10 \log \left(\frac{8}{7} \times 10 \times \frac{841}{1024} \right) + 0 + 7 \\
 &= -131.637 \text{ dB} \\
 &= -161.637 \text{ dBm}
 \end{aligned}$$

Tabel 4.10 Hasil perhitungan *Receiver Sensitivity*

Tipe Modulasi	<i>Receiver Sensitivity</i> (dB)
BPSK $1/2$	-131.637
QPSK $1/2$	-128.637
QPSK $3/4$	-126.837
16-QAM $1/2$	-121.637
16-QAM $3/4$	-119.837
64-QAM $2/3$	-115.337
64-QAM $3/4$	-113.637

(Sumber: Perhitungan)

Dari hasil perhitungan didapat bahwa semakin tinggi orde modulasi, maka nilai *Receiver Sensitivity* akan semakin tinggi.

4.2.4 Penentuan jarak efektif tiap modulasi

Penentuan jarak efektif tiap modulasi dibutuhkan untuk mengetahui berapa batas pemancar dapat menjangkau penerima. Jauh tidaknya jarak jangkauan sangat dipengaruhi oleh kondisi kanal yang digunakan meliputi besarnya nilai rugi-rugi propagasi tiap modulasi dan sensitivitas penerima yang berhubungan dengan nilai SNR penerima yang digunakan.

Nilai rugi-rugi propagasi tiap modulasi dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$P_{L \text{ modulasi}}(dB) = EIRP + Grx - Lrx - Rss$$

dimana,

EIRP = *Effective Isotropic Radiated Power*

Gr_x = Penguatan antena penerima

Lr_x = Rugi-rugi saluran penerima

R_{ss} = *Receiver Sensitivity*

Setelah mendapatkan nilai rugi-rugi propagasi tiap modulasi, maka akan didapatkan batas maksimal *Base Station* untuk memancarkan sinyal sesuai dengan modulasi yang digunakan. Batas maksimal tiap modulasi berbeda-beda untuk setiap wilayah urban, suburban dan rural.

1) Wilayah Urban

$$P_L = 47 \log_{10}(d) - 0.9397$$

R_{ss} pada modulasi BPSK 1/2 adalah -131.637 dB, maka:

$$P_{LBPSK\ 1/2}(dB) = EIRP + Gr_x - Lr_x - R_{ss}$$

$$P_{LBPSK\ 1/2}(dB) = 27.3 + (-1) - 2 - (-131.637)$$

$$P_{LBPSK\ 1/2}(dB) = 155.937\ dB$$

sehingga,

$$155.937 = 47 \log_{10}(d) - 0.9397$$

$$156.8767 = 47 \log_{10}(d)$$

$$3.34 = \log_{10}(d)$$

$$d = 2176.66m$$

Tabel 4.11 Hasil Perhitungan Jarak Jangkau BS-SS untuk Wilayah Urban

Tipe Modulasi	Jarak Jangkau <i>Base Station</i> (m)
BPSK 1/2	2176.66
QPSK 1/2	1879.15
QPSK 3/4	1720.54
16QAM 1/2	1333.6
16QAM 3/4	1221.03
64QAM 2/3	979.45
64QAM 3/4	901.18

(Sumber: Perhitungan)

2) Wilayah Suburban

$$P_L = 43.264 \log_{10}(d) + 6.5323$$

Rss pada modulasi BPSK 1/2 adalah -131.637 dB, maka:

$$P_{LBPSK \frac{1}{2}}(dB) = EIRP + Grx - Lrx - Rss$$

$$P_{LBPSK \frac{1}{2}}(dB) = 27.3 + (-1) - 2 - (-131.637)$$

$$P_{LBPSK \frac{1}{2}}(dB) = 155.937 \text{ dB}$$

sehingga,

$$155.937 = 43.264 \log_{10}(d) + 6.5323$$

$$149.4042 = 43.264 \log_{10}(d)$$

$$3.45 = \log_{10}(d)$$

$$d = 2839.96 \text{ m}$$

Tabel 4.12 Hasil Perhitungan Jarak Jangkau BS-SS untuk Wilayah Sub Urban

Type Modulasi	Jarak Jangkau Base Station (m)
BPSK 1/2	2839.96
QPSK 1/2	2420.88
QPSK 3/4	2199.72
16QAM 1/2	1667.92
16QAM 3/4	1515.55
64QAM 2/3	1192.77
64QAM 3/4	1089.59

(Sumber: Perhitungan)

3) Wilayah Rural

$$P_L = 40.65 \log_{10}(d) + 11.7603$$

Rss pada modulasi BPSK 1/2 adalah -131.637 dB, maka:

$$P_{LBPSK \frac{1}{2}}(dB) = EIRP + Grx - Lrx - Rss$$

$$P_{LBPSK \frac{1}{2}}(dB) = 27.3 + (-1) - 2 - (-131.637)$$

$$P_{LBPSK \frac{1}{2}}(dB) = 155.937 \text{ dB}$$

sehingga,

$$155.937 = 40.65 \log_{10}(d) + 11.7603$$

$$167.6968 = 40.65 \log_{10}(d)$$

$$4.13 = \log_{10}(d)$$

$$d = 13346.97\text{m}$$

Tabel 4.13 Hasil Perhitungan Jarak Jangkau BS-SS untuk Wilayah Rural

Type Modulasi	Jarak Jangkau <i>Base Station</i> (m)
BPSK 1/2	13346.97
QPSK 1/2	11261.13
QPSK 3/4	10169.54
16QAM 1/2	7574.96
16QAM 3/4	6840.69
64QAM 2/3	5301.5
64QAM 3/4	4814.8

(Sumber: Perhitungan)

Dari hasil perhitungan didapat bahwa semakin besar orde modulasi maka jarak jangkauan BS-SS akan semakin kecil.

4.3 Penentuan *Bit rate*

Untuk melakukan perhitungan *bit rate* pada tipe modulasi yang berbeda-beda, yaitu BPSK, QPSK, 16-QAM dan 64-QAM diperlukan perhitungan durasi simbol OFDMA yaitu:

$$T_s = T_b + T_g$$

$$T_b = \frac{N_{FFT}}{BW \times \eta} \text{ dan } T_g = G \times T_b$$

Karena pada penelitian ini tidak memperhitungkan pengaruh panjang *cyclic prefix*, maka nilai G dianggap tidak ada, sehingga

$$T_s = T_b$$

$$T_s = \frac{N_{FFT}}{BW \times \eta}$$

$$T_s = \frac{1024}{10^7 \times \frac{28}{25}} = 9.1426 \times 10^{-5} \text{ s}$$

Maka perhitungan *bit rate* untuk modulasi BPSK dengan *coding rate* (*cr*) 1/2, dengan N_{used} sebesar 841, *bm* atau jumlah bit yang digunakan tiap modulasi adalah 2, dan $T_s = 9.1426 \times 10^{-5} \text{ s}$ adalah:

$$\begin{aligned} \text{bit rate(BPSK 1/2)} &= N_{used} \times bm \times \frac{C_r}{T_s} \\ &= 841 \times 1 \times \frac{\frac{1}{2}}{9.1426 \times 10^{-5}} \\ &= 4599348 \text{bps} \\ &= 4.6 \text{ Mbps} \end{aligned}$$

Tabel 4.14 Hasil Perhitungan *Bit rate* untuk tiap modulasi yang berbeda

Tipe Modulasi	<i>Bit rate</i> (Mbps)
BPSK 1/2	4.6
QPSK 1/2	9.2
QPSK 3/4	13.8
16QAM 1/2	18.4
16QAM 3/4	27.6
64QAM 2/3	36.0
64QAM 3/4	41.4

(Sumber: Perhitungan)

Bit rate dipengaruhi oleh banyaknya bit yang digunakan dalam modulasi, semaiqn banyak bit yang digunakan maka nilai *bit rate* akan semakin besar.

4.4 Penentuan Kapasitas Kanal

Perhitungan kapasitas kanal menggunakan teorema Shannon yang terdapat pada persamaan 2-19. Untuk menghitung kapasitas kanal, dibutuhkan parameter *bandwidth* dan SNR sistem. SNR sistem didapat dari perkalian antara SNR dan *cyclic prefix*, karena pada penelitian ini tidak membahas pengaruh *cyclic prefix* sehingga SNR sistem bernilai sama dengan SNR.

Kapasitas kanal untuk modulasi BPSK $\frac{1}{2}$ dengan nilai SNR= 6.4 dB= 4.365 watt, adalah sebagai berikut:

$$C = B_{sistem} \cdot \log_2(1 + SNR_{sistem}) = 10 \times 10^6 \cdot \log_2(1 + 4.365) = 24.24 \text{ Mbps}$$

Tabel 4.15 Hasil perhitungan kapasitas kanal

Tipe Modulasi	Kapasitas Kanal (Mbps)
BPSK $\frac{1}{2}$	24.24
QPSK $\frac{1}{2}$	32.79
QPSK $\frac{3}{4}$	38.26
16QAM $\frac{1}{2}$	54.81
16QAM $\frac{3}{4}$	60.67
64QAM $\frac{2}{3}$	75.49
64QAM $\frac{3}{4}$	81.11

(Sumber: Perhitungan)

Besarnya kapasitas kanal bergantung dari nilai *signal to noise ratio*, semakin tinggi orde modulasi akan meningkatkan *signal to noise ratio* sehingga kapasitas kanal akan semakin besar.

4.5 Analisis Bit Error Rate (BER) pada jaringan mobile WiMAX

Dalam perhitungan BER diperlukan nilai E_b/N_o (*Energy bit to Noise Ratio*). E_b/N_o merupakan perbandingan energi sinyal per bit terhadap *noise*.

Untuk memperoleh nilai E_b/N_o dengan menggunakan teknik modulasi BPSK $\frac{1}{2}$ dengan nilai SNR = 6.4 dB yang mempunyai data rate sebesar 4.6 Mbps dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan,

$$\begin{aligned} \frac{E_b}{N_o} &= \frac{S}{N} - 10 \log \frac{B}{R} \\ &= 6.4 - 10 \log \frac{10 \times 10^6}{4.6 \times 10^6} \\ &= 6.4 - 3.37 \\ &= 3.03 \text{ dB} \end{aligned}$$

Dengan cara perhitungan yang sama untuk modulasi QPSK $\frac{1}{2}$, QPSK $\frac{3}{4}$, 16QAM $\frac{1}{2}$, 16QAM $\frac{3}{4}$, 64QAM $\frac{2}{3}$, 64QAM $\frac{3}{4}$ yang mempunyai nilai SNR dan data rate yang telah dihitung sebelumnya, maka diperoleh hasil analisis nilai Eb/No yang ditunjukkan pada tabel 4.13,

Tabel 4.16 Hasil Perhitungan *Energy bit per Noise Ratio* dengan tipe modulasi berbeda

Tipe Modulasi	Eb/No (dB)
BPSK $\frac{1}{2}$	3.027578
QPSK $\frac{1}{2}$	9.037878
QPSK $\frac{3}{4}$	12.59879
16QAM $\frac{1}{2}$	19.04818
16QAM $\frac{3}{4}$	22.60909
64QAM $\frac{2}{3}$	28.26303
64QAM $\frac{3}{4}$	30.53842

(Sumber: Perhitungan)

Setelah mendapatkan nilai Eb/No tiap modulasi, langkah berikutnya adalah menghitung nilai BER pada masing-masing modulasi yang digunakan.

1) Modulasi BPSK $\frac{1}{2}$

Besarnya nilai BER atau probabilitas *bit error* (P_b) dengan menggunakan teknik modulasi BPSK $\frac{1}{2}$ dengan Eb/No= 3.027578 dB dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2-17),

$$\begin{aligned}
 P_b = P_s &= Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) \\
 &= \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \\
 &= \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \sqrt{3.027578} \\
 &= \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(1.73999)
 \end{aligned}$$

Sehingga nilai P_b BPSK $\frac{1}{2}$ = 0.0069

2) Modulasi QPSK ½

Besarnya nilai BER atau probabilitas *bit error* (P_b) dengan menggunakan teknik modulasi QPSK ½ dengan $E_b/N_0 = 9.037878$ dB dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2-18),

$$\begin{aligned} P_b = P_s &= Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) \\ &= \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \\ &= \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \sqrt{9.037878} \\ &= \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(3.0063) \end{aligned}$$

Sehingga nilai $P_b \text{ QPSK } 1/2 = 1.0623 \times 10^{-5}$

3) Modulasi QPSK ¾

Besarnya nilai BER atau probabilitas *bit error* (P_b) dengan menggunakan teknik modulasi QPSK ¾ dengan $E_b/N_0 = 9.037878$ dB dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2-18),

$$\begin{aligned} P_b = P_s &= Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) \\ &= \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \\ &= \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \sqrt{12.59879} \\ &= \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(3.5495) \end{aligned}$$

Sehingga nilai $P_b \text{ QPSK } 3/4 = 2.5893 \times 10^{-7}$

4) Modulasi 16 QAM $\frac{1}{2}$

Besarnya nilai BER atau probabilitas *bit error* (P_b) dengan menggunakan teknik modulasi 16QAM $\frac{1}{2}$ dengan $E_b/N_0 = 19.04818$ dB dan nilai $M=16$ dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2-19),

$$\begin{aligned} P_{b \text{ 16QAM } 1/2} &= \frac{4(\sqrt{M}) - 1}{\sqrt{M} \log_2 M} Q \left(\sqrt{\frac{3 \log_2 M E_b}{(M - 1) N_0}} \right) \\ &= \frac{2(\sqrt{M} - 1)}{\sqrt{M} \log_2 M} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{3 \log_2 M E_b}{4(M - 1) N_0}} \right) \\ &= \frac{2(\sqrt{16} - 1)}{\sqrt{16} \log_2 16} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{3 \log_2 16}{4(16 - 1)} \times 19.04818} \right) \\ &= \frac{6}{16} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{12}{60} \times 19.04818} \right) \\ &= 0.375 \operatorname{erfc}(1.9518) \end{aligned}$$

Sehingga nilai $P_{b \text{ 16QAM } 1/2} = 0.0043$

5) Modulasi 16 QAM $\frac{3}{4}$

Besarnya nilai BER atau probabilitas *bit error* (P_b) dengan menggunakan teknik modulasi 16QAM $\frac{3}{4}$ dengan $E_b/N_0 = 22.60909$ dB dan nilai $M=16$ dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2-19),

$$\begin{aligned} P_{b \text{ 16QAM } 3/4} &= \frac{2(\sqrt{M} - 1)}{\sqrt{M} \log_2 M} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{3 \log_2 M E_b}{4(M - 1) N_0}} \right) \\ &= \frac{2(\sqrt{16} - 1)}{\sqrt{16} \log_2 16} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{3 \log_2 16}{4(16 - 1)} \times 22.60909} \right) \\ &= \frac{6}{16} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{12}{60} \times 22.60909} \right) \\ &= 0.375 \operatorname{erfc}(2.1265) \end{aligned}$$

Sehingga nilai $P_{b\ 16QAM\ 3/4} = 0.0020$

6) Modulasi 64 QAM $2/3$

Besarnya nilai BER atau probabilitas *bit error* (P_b) dengan menggunakan teknik modulasi 16QAM $2/3$ dengan $E_b/N_0 = 28.26303$ dB dan nilai $M=64$ dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2-19),

$$\begin{aligned}
 P_{b\ 64QAM\ 2/3} &= \frac{2(\sqrt{M} - 1)}{\sqrt{M} \log_2 M} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{3 \log_2 M E_b}{4(M - 1) N_0}} \right) \\
 &= \frac{2(\sqrt{64} - 1)}{\sqrt{64} \log_2 64} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{3 \log_2 64}{4(64 - 1)} \times 28.26303} \right) \\
 &= \frac{14}{48} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{18}{252} \times 28.26303} \right) \\
 &= 0.292 \operatorname{erfc}(1.421)
 \end{aligned}$$

Sehingga nilai $P_{b\ 64QAM\ 2/3} = 0.0257$

7) Modulasi 64 QAM $3/4$

Besarnya nilai BER atau probabilitas *bit error* (P_b) dengan menggunakan teknik modulasi 16QAM $3/4$ dengan $E_b/N_0 = 30.53842$ dB dan nilai $M=64$ dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2-19),

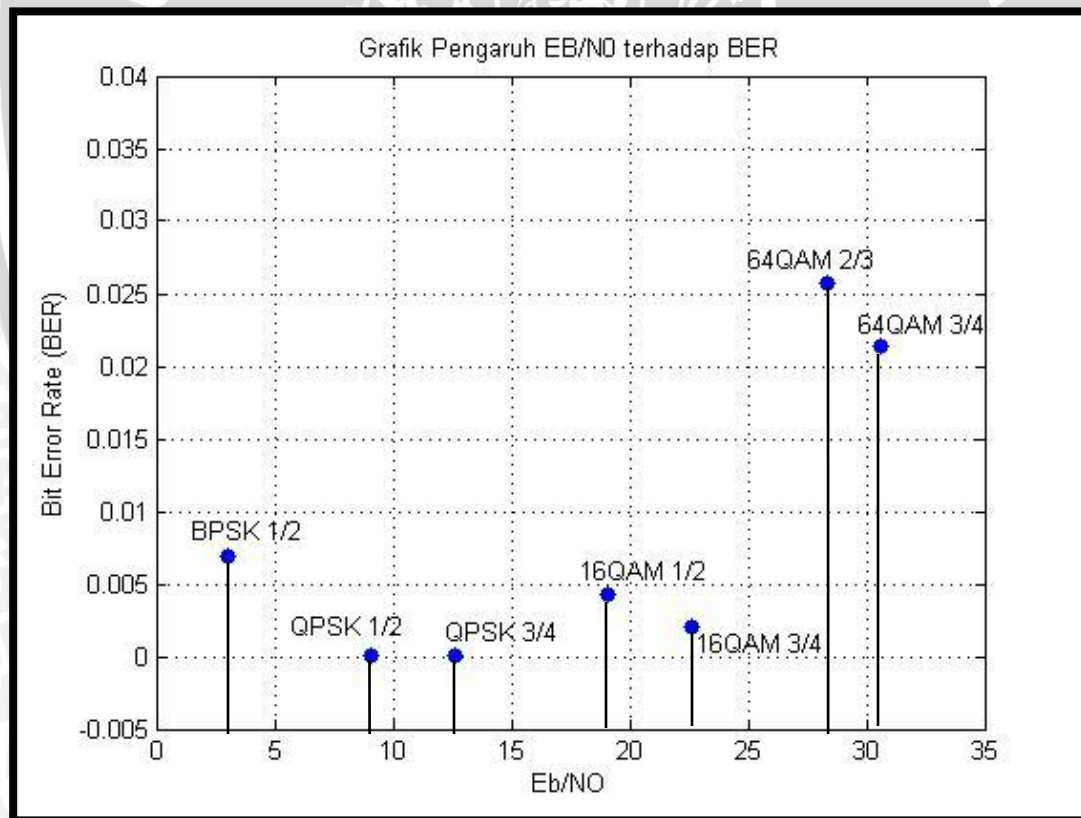
$$\begin{aligned}
 P_{b\ 16QAM\ 3/4} &= \frac{2(\sqrt{M} - 1)}{\sqrt{M} \log_2 M} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{3 \log_2 M E_b}{4(M - 1) N_0}} \right) \\
 &= \frac{2(\sqrt{64} - 1)}{\sqrt{64} \log_2 64} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{3 \log_2 64}{4(64 - 1)} \times 30.53842} \right) \\
 &= \frac{14}{48} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{18}{252} \times 30.53842} \right) \\
 &= 0.292 \operatorname{erfc}(1.477)
 \end{aligned}$$

Sehingga nilai $P_b_{64QAM\ 3/4} = 0.0214$

Tabel 4.17 Hasil Perhitungan *Bit Error Rate* (BER)

Tipe Modulasi	E_b/N_0 (dB)	BER
BPSK $\frac{1}{2}$	3.027578	0.0069
QPSK $\frac{1}{2}$	9.037878	1.0623×10^{-5}
QPSK $\frac{3}{4}$	12.59879	2.5893×10^{-7}
16QAM $\frac{1}{2}$	19.04818	0.0043
16QAM $\frac{3}{4}$	22.60909	0.0020
64QAM $\frac{2}{3}$	28.26303	0.0257
64QAM $\frac{3}{4}$	30.53842	0.0214

(Sumber: Perhitungan)



Gambar 4.1 Grafik Pengaruh E_b/N_0 terhadap Bit Error Rate (BER)

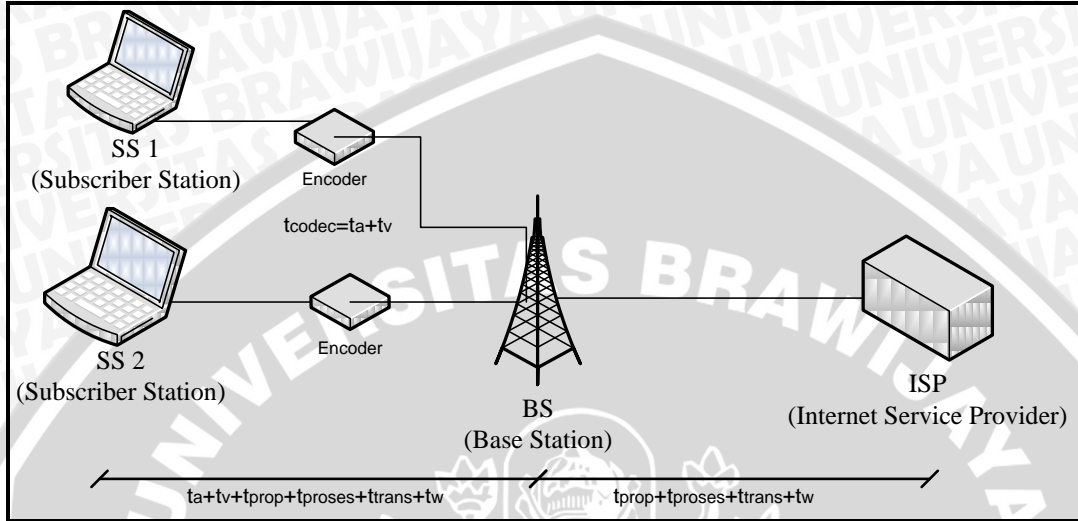
(Sumber: Hasil Analisis)

1. Penentuan penggunaan modulasi pada jaringan WiMAX dipengaruhi oleh kemampuan penerima untuk menerima sinyal, hal tersebut dapat diketahui dari parameter *Signal to Noise Ratio* (SNR) di sisi penerima.
2. Jarak jangkauan efektif antara *Base Station* dan *Subscriber Station* dipengaruhi oleh besarnya daya pancar transmisi pemancar, kemampuan penerimaan sinyal di penerima (*receiver sensitivity*), redaman propagasi yang ditandai oleh padat tidaknya penghalang pada saat sinyal merambat sampai ke penerima pada suatu wilayah tertentu sehingga akan berpengaruh terhadap nilai SNR di penerima.
3. Nilai SNR pada sisi penerima menentukan jenis modulasi yang digunakan sesuai dengan ketentuan standar WiMAX.
4. Perubahan nilai SNR penerima akan berpengaruh terhadap nilai BER.
5. Pada gambar 4.1 menggambarkan pengaruh E_b/N_0 terhadap nilai BER pada tiap modulasi. BER standar *video conference* adalah kurang dari 10^{-4} sedangkan BER sistem dengan modulasi BPSK $\frac{1}{2}$ adalah 6.9×10^{-4} sehingga tidak sesuai dengan BER standar *video conference*. BER sistem dengan modulasi QPSK $\frac{1}{2}$ dan QPSK $\frac{3}{4}$ berturut-turut adalah 1.0623×10^{-5} dan 2.5893×10^{-7} . BER system QPSK masih memenuhi standar BER *video conference*. Pada modulasi QAM menggunakan perumusan yang berbeda dari modulasi BPSK atau QPSK. Nilai BER system dengan modulasi QAM lebih besar dari standar BER *video conference*, jadi BER modulasi QAM tidak memenuhi standar BER *video conference*.
6. Dari hasil analisis agar modulasi BPSK dan QAM memenuhi standar BER *video conference*, maka *transmitter* harus menyesuaikan (adaptif) kenaikan nilai daya pancar *transmitter* dengan acuan parameter adaptasi nilai SNR dan BER penerima.

4.6 Analisis *Delay end-to-end* pada jaringan *mobile WiMAX*

Dalam penelitian ini akan menganalisis *delay end to end video conference* untuk mengetahui besarnya *delay* keseluruhan pada saat transmisi dengan menggunakan informasi berupa *audio* dan *video*. Besarnya *delay* keseluruhan pada

jaringan WiMAX merupakan waktu yang diperlukan dalam pentransmisian dari ISP (*Internet Service Provider*) menuju ke BS (*Base Station*) hingga diterima di SS (*Subscriber Station*).



Gambar 4.2 Analisis *Delay end to end*
(Sumber: Hasil Analisis)

- Analisis Paket Data *Video conference*

Untuk menganalisis layanan *video conference* pada jaringan *mobile WiMAX*, *payload video conference* yang ditransmisikan terdiri dari *payload audio* dan *video*. Pada penelitian ini, *audio CODEC* yang digunakan adalah G.711 dengan *bandwidth* 64 Kbps dan *video CODEC* H.264 dengan *bandwidth* 384 Kbps serta *frame rate* sebesar 30fps atau 33ms. Untuk mencari nilai *payload audio* dan *video* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$P_{LA} = B_{CODEC} \times frame\ rate$$

$$= 64 \times 10^3 bps \times 33 \times 10^{-3} = 2112\ bit$$

$$P_{LV} = B_{CODEC} \times frame\ rate$$

$$= 384 \times 10^3 bps \times 33 \times 10^{-3} = 12672\ bit$$

Besarnya nilai *payload* maksimal *audio* dan *video* akan mempengaruhi jumlah masing-masing paket yang dikirimkan, sehingga paket *audio* dan *video* dapat dihitung menggunakan persamaan :

$$P_A = \frac{P_{LA}}{P_{LA \max}} = \frac{2112}{160} = 13.2 \text{ paket}$$

$$P_V = \frac{P_{LV}}{P_{LV \max}} = \frac{12672}{254} = 49.8898 \text{ paket}$$

Jumlah paket data *video conference* merupakan penjumlahan *payload audio* dan *video* dengan *header* NALU,RTP,UDP dan IP, dapat dihitung dengan persamaan:

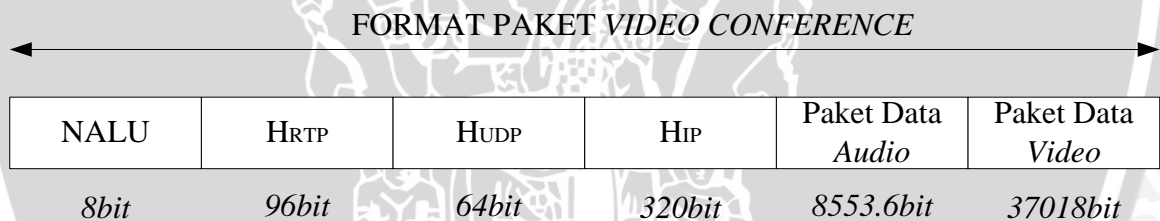
$$\begin{aligned} \text{Paket data audio} &= P_{LA} + (P_A \times (NALU + H_{RTP} + H_{UDP} + H_{IP})) \\ &= 2112 + (13.2 \times (8 + 96 + 64 + 320)) \\ &= 8553.6 \text{ bit} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Paket data video} &= P_{LV} + (P_V \times (NALU + H_{RTP} + H_{UDP} + H_{IP})) \\ &= 12672 + (49.8898 \times (8 + 96 + 64 + 320)) \\ &= 37018 \text{ bit} \end{aligned}$$

Sehingga panjang paket data *video conference* dapat dihitung dengan persamaan:

$$W_{data} = P_{data \text{ audio}} + P_{data \text{ video}} = 8553.6 + 37018 = 45571.6 \text{ bit} = 5696.5 \text{ byte}$$

Format paket data *video conference* ditunjukkan pada gambar berikut:



Gambar 4.3 Format Paket *Video conference*

(Sumber: Hasil Analisis)

- Analisis *Delay* CODEC

Delay CODEC adalah *delay* yang terjadi di sisi *encoder*. *Delay* CODEC *video conference* terdiri dari *delay* CODEC *audio* dan *video*. *Delay* CODEC pada *audio* G.711 sebesar 0.75 ms dan *delay* CODEC pada *video* H.246 sebesar 150ms, sehingga *delay* CODEC dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$t_{codec} = 2(0.75 \text{ ms} + 150 \text{ ms}) = 301.5 \times 10^{-3} \text{ s}$$

- Analisis *Delay* MAN

Delay MAN terdiri dari *delay* proses, *delay* propagasi, *delay* transmisi dan *delay* antrian. *Delay* MAN dapat dihitung dengan persamaan (2-33):

Delay Proses

Data *audio* dan *video* yang terdapat pada layer aplikasi akan menuju layer *transport* akan mengalami perubahan format data yaitu terjadi penambahan *header* RTP dan UDP sehingga data berubah menjadi segmen, besarnya data yang ditambahkan *header* RTP dapat dihitung dengan persamaan (2-34):

$$W_{message} = W_{data} + Header_{RTP} = 5696.5 \text{ byte} + 12 \text{ byte} = 5708.5 \text{ byte}$$

Pada layer *transport* ditambahkan *header* UDP, tetapi karena panjang segmen data melebihi *Maximal Segmen Size* (MSS) sebesar 1460 *byte*, maka dilakukan proses fragmentasi, jumlah segmen hasil fragmentasi pada UDP adalah

$$N_{segmen} = \frac{W_{message}}{MSS} = \frac{5708.5 \text{ byte}}{1460 \text{ byte}} = 3.9099 \text{ segmen}$$

Dari hasil perhitungan jumlah segmen UDP, terdapat 3 buah segmen yang berisi data 1460 *byte* dan 1 segmen berisi data sebesar $0.9099 \times 1460 = 1328.454 \text{ byte}$, sehingga total segmen yang dikirimkan adalah 4 segmen UDP. Setelah segmen difragmentasi, proses berikutnya adalah proses enkapsulasi sesuai dengan persamaan (2-36) yaitu:

$$\begin{aligned} W_{segmen} &= W_{message} + (N_{segmen} \times Header_{UDP}) = 5708.5 \text{ byte} + (4 \times 8 \text{ byte}) \\ &= 5740.5 \text{ byte} \end{aligned}$$

Dari layer *transport*, segmen kemudian diteruskan menuju layer internet, terjadi proses penambahan *header* IP sehingga segmen UDP berubah menjadi datagram IP. Dengan persamaan (2-37) diperoleh:

$$W_{datagram} = W_{segmen} + Header_{IP} = 5740.5 \text{ byte} + 20 \text{ byte} = 5760.5 \text{ byte}$$

Datagram IP dienkapsulasi menjadi frame *Ethernet*, datagram IP dienkapsulasi dengan menambahkan *header ethernet* sebesar 18 *byte* pada layer network dengan menggunakan protokol *Ethernet*. Secara matematis, $W_{frame \text{ ethernet}}$ dicari dengan persamaan 2-38:

$$W_{frame \text{ ethernet}} = W_{datagram} + Header_{Ethernet} = 5760.5 \text{ byte} + 18 \text{ byte} = 5778.5 \text{ byte}$$

Dari *Ethernet*, frame *Ethernet* dikirimkan ke layer MAC WiMAX dan mengalami penambahan header MAC sebesar 6 byte. Maka W_{frame} total dapat dicari dengan persamaan 2-39:

$$W_{frame\ total} = W_{frame\ ethernet} + Header_{MAC} = 5778.5\ byte + 6\ byte$$

$$= 5784.5\ byte$$

Maka besar *delay* enkapsulasi dengan kecepatan layer *ethernet* adalah 100 Mbps untuk modulasi BPSK 1/2 dengan c_{WiMAX} 24.24 Mbps adalah:

$$t_{enc1} = \frac{W_{frame\ total} - W_{data}}{c_{Ethernet}} \times 8 = \frac{5784.5 - 5696.5}{10^8} \times 8 = 0.000704 \times 10^{-3}\ s$$

$$t_{enc2} = \frac{W_{frame\ total} - W_{data}}{c_{WiMAX}} \times 8 = \frac{5784.5 - 5696.5}{24.24 \times 10^6} \times 8 = 0.02904 \times 10^{-3}\ s$$

Besar *delay* dekapsulasi dengan kecepatan layer *ethernet* adalah 100 Mbps untuk modulasi BPSK 1/2 dengan c_{WiMAX} 24.24 Mbps adalah:

$$t_{dec1} = \frac{W_{frame\ total} - W_{data}}{c_{WiMAX}} \times 8 = \frac{5784.5 - 5696.5}{24.24 \times 10^6} \times 8 = 0.02904 \times 10^{-3}\ s$$

$$t_{dec2} = \frac{W_{frame\ total} - W_{data}}{c_{Ethernet}} \times 8 = \frac{5784.5 - 5696.5}{10^8} \times 8 = 0.000704 \times 10^{-3}\ s$$

Sehingga didapatkan *delay* proses:

$$t_{proc} = t_{enc1} + t_{enc2} + t_{dec1} + t_{dec2}$$

$$= 0.000704 \times 10^{-3}\ s + 0.02904 \times 10^{-3}\ s + 0.02904 \times 10^{-3}\ s + 0.000704 \times 10^{-3}\ s$$

$$= 0.0721 \times 10^{-3}\ s$$

Tabel 4.18 Hasil Pehitungan *Delay* Proses

Type Modulasi	c_{WiMAX} (Mbps)	<i>Delay</i> proses (s)
BPSK 1/2	24.24	0.0721×10^{-3}
QPSK 1/2	32.79	0.057×10^{-3}
QPSK 3/4	38.26	0.0508×10^{-3}
16QAM 1/2	54.81	0.0397×10^{-3}
16QAM 3/4	60.67	0.0372×10^{-3}
64QAM 2/3	75.49	0.0327×10^{-3}

Tipe Modulasi	c_{WiMAX} (Mbps)	Delay proses (s)
64QAM $\frac{3}{4}$	81.11	0.0314×10^{-3}

(Sumber: Perhitungan)

Besarnya *delay* proses dipengaruhi oleh kapasitas media transmisi, semakin besar kapasitas media transmisi maka *delay* prosesnya akan semakin kecil.

Delay Propagasi

Delay propagasi merupakan waktu yang dibutuhkan untuk merambatkan paket data pada media transmisi yaitu gelombang radio. Jarak antara *Base Station* dan *Subscriber Station* berbeda-beda untuk tiap modulasi sesuai dengan kondisi wilayah yaitu urban, suburban dan rural. Untuk modulasi BPSK $\frac{1}{2}$ pada wilayah urban yang memiliki jarak terjauh 2176.66 m, maka *delay* propagasi dapat dihitung dengan persamaan 2-43:

$$t_{prop} = \frac{d_{max}}{v} = \frac{2176.66}{3 \times 10^8} = 0.00726 \times 10^{-3} \text{ s}$$

Besarnya *delay* propagasi untuk wilayah urban dengan tipe modulasi yang lain adalah sebagai berikut:

Tabel 4.19 Hasil Perhitungan *Delay* Propagasi untuk Wilayah Urban

Tipe Modulasi	Jarak jangkau BS-SS (m)	Delay Propagasi (s)
BPSK $\frac{1}{2}$	2176.66	0.00726×10^{-3}
QPSK $\frac{1}{2}$	1879.15	0.00626×10^{-3}
QPSK $\frac{3}{4}$	1720.54	0.00574×10^{-3}
16QAM $\frac{1}{2}$	1333.6	0.00445×10^{-3}
16QAM $\frac{3}{4}$	1221.03	0.00407×10^{-3}
64QAM $\frac{2}{3}$	979.45	0.00326×10^{-3}
64QAM $\frac{3}{4}$	901.18	0.00300×10^{-3}

(Sumber: Perhitungan)

Besarnya *delay* propagasi untuk wilayah suburban dengan tipe modulasi yang berbeda adalah sebagai berikut:

Tabel 4.20 Hasil Perhitungan *Delay* Propagasi untuk Wilayah Sub Urban

Tipe Modulasi	Jarak jangkau BS-SS (m)	<i>Delay</i> Propagasi (s)
BPSK $\frac{1}{2}$	2839.96	0.00947×10^{-3}
QPSK $\frac{1}{2}$	2420.88	0.00807×10^{-3}
QPSK $\frac{3}{4}$	2199.72	0.00733×10^{-3}
16QAM $\frac{1}{2}$	1667.92	0.00557×10^{-3}
16QAM $\frac{3}{4}$	1515.55	0.00505×10^{-3}
64QAM $\frac{2}{3}$	1192.77	0.00398×10^{-3}
64QAM $\frac{3}{4}$	1089.59	0.00363×10^{-3}

(Sumber: Perhitungan)

Besarnya *delay* propagasi untuk wilayah rural dengan tipe modulasi yang berbeda adalah sebagai berikut:

Tabel 4.21 Hasil Perhitungan *Delay* Propagasi untuk Wilayah Rural

Tipe Modulasi	Jarak jangkau BS-SS (m)	<i>Delay</i> Propagasi (s)
BPSK $\frac{1}{2}$	13346.97	0.0445×10^{-3}
QPSK $\frac{1}{2}$	11261.13	0.0375×10^{-3}
QPSK $\frac{3}{4}$	10169.54	0.0339×10^{-3}
16QAM $\frac{1}{2}$	7574.96	0.0252×10^{-3}
16QAM $\frac{3}{4}$	6840.69	0.0228×10^{-3}
64QAM $\frac{2}{3}$	5301.5	0.0177×10^{-3}
64QAM $\frac{3}{4}$	4814.8	0.0160×10^{-3}

(Sumber: Perhitungan)

Delay propagasi dipengaruhi oleh besarnya jarak jangkau *base station* dan *subscriber station*. Semakin besar *delay* propagasi diakibatkan oleh bertambahnya jarak jangkauan BS-SS.

Delay Transmisi

Besarnya *delay* transmisi dipengaruhi oleh ukuran paket serta kapasitas media transmisi, secara matematis besarnya *delay* transmisi dengan menggunakan modulasi BPSK 1/2 dinyatakan dalam persamaan 2-44 yaitu:

$$t_{trans} = \frac{w}{c} \times 8 = \frac{5784.5 \text{ byte}}{24.24 \times 10^6 \text{ bps}} \times 8 = 1.9 \times 10^{-3} s$$

Tabel 4.22 Hasil Perhitungan *Delay* Transmisi

Tipe Modulasi	C_{WiMAX} (Mbps)	<i>Delay</i> transmisi (s)
BPSK 1/2	24.24	1.9×10^{-3}
QPSK 1/2	32.79	1.4×10^{-3}
QPSK 3/4	38.26	1.2×10^{-3}
16QAM 1/2	54.81	0.84×10^{-3}
16QAM 3/4	60.67	0.76×10^{-3}
64QAM 2/3	75.49	0.61×10^{-3}
64QAM 3/4	81.11	0.57×10^{-3}

(Sumber: Perhitungan)

Besarnya *delay* transmisi dipengaruhi oleh kapasitas media transmisi, semakin besar kapasitas media transmisi maka *delay* transmisi akan semakin kecil.

Delay Antrian

Delay antrian dapat dihitung dengan menggunakan model antrian M/M/1 dengan disiplin antrian FIFO. Model antrian M/M/1 untuk modulasi BPSK 1/2 dengan kapasitas kanal 24.24 Mbps dapat ditulis sesuai dengan persamaan (2-45), untuk nilai waktu pelayanan dapat dihitung dengan:

$$\mu = \frac{c}{w} = \frac{24.24 \times 10^6}{5784.5 \times 8} = 523.7339 \text{ paket/s}$$

Besarnya kecepatan kedatangan dengan faktor utilisasi 0.1 adalah:

$$\lambda_w = \mu \rho = 523.7339 \times 0.1 = 52.37339$$

Sehingga besarnya *delay* antrian adalah

$$t_w = \frac{\lambda_w}{\mu(\mu - \lambda_w)} + \frac{1}{\mu} = \frac{52.37339}{523.7339(523.7339 - 52.37339)} + \frac{1}{523.7339} = 2.1 \times 10^{-3} s$$

Tabel 4.23 Hasil Perhitungan *Delay* Antrian

Faktor Utilisasi	<i>Delay</i> Antrian ($\times 10^{-3}$ s)						
	BPSK ½	QPSK ½	QPSK ¾	16QAM 1/2	16QAM ¾	64QAM 2/3	64QAM ¾
0.1	2.1	1.6	1.3	0.9	0.8	0.7	0.6
0.2	2.4	1.8	1.5	1.1	1.0	0.8	0.7
0.3	2.7	2.0	1.7	1.2	1.1	0.9	0.8
0.4	3.2	2.4	2.0	1.4	1.3	1.0	1.0
0.5	3.8	2.8	2.4	1.7	1.5	1.2	1.1
0.6	4.8	3.5	3.0	2.1	1.9	1.5	1.4
0.7	6.4	4.7	4.0	2.8	2.5	2.0	1.9
0.8	9.5	7.1	6.0	4.2	3.8	3.1	2.9
0.9	19.1	14.1	12.1	8.4	7.6	6.1	5.7

(Sumber: Perhitungan)

Setelah menentukan *delay* proses, *delay* propagasi, *delay* transmisi dan *delay* antrian, maka didapat nilai *delay* MAN yang merupakan penjumlahan dari *delay* tersebut. *Delay* MAN terjadi diantara SS-BS serta BS-ISP. Berikut merupakan perhitungan matematis *delay* MAN untuk modulasi BPSK ½ pada daerah urban:

$$\begin{aligned}
 t_{MAN} &= t_{proses} + t_{prop} + t_{trans} + t_w \\
 &= 0.0721 \times 10^{-3}s + 0.0076 \times 10^{-3}s + 1.9 \times 10^{-3}s + 2.1 \times 10^{-3}s \\
 &= 4.1 \times 10^{-3}s
 \end{aligned}$$

Dengan menggunakan cara yang sama, perhitungan *delay* MAN untuk modulasi lain pada daerah urban, suburban dan rural ditunjukkan pada tabel di bawah ini:

Tabel 4.24 Hasil Perhitungan *Delay* MAN untuk Wilayah Urban

Faktor Utilisasi	<i>Delay</i> MAN ($\times 10^{-3}$ s)						
	BPSK ½	QPSK ½	QPSK ¾	16QAM 1/2	16QAM ¾	64QAM 2/3	64QAM ¾
0.1	4.1	3.0	2.6	1.8	1.7	1.3	1.2
0.2	4.4	3.2	2.8	1.9	1.8	1.4	1.3
0.3	4.7	3.5	3.0	2.1	1.9	1.5	1.4
0.4	5.2	3.8	3.3	2.3	2.1	1.7	1.6
0.5	5.8	4.3	3.7	2.6	2.3	1.9	1.7
0.6	6.8	5.0	4.3	3.0	2.7	2.2	2.0
0.7	8.4	6.2	5.3	3.7	3.3	2.7	2.5

Faktor Utilisasi	Delay MAN ($\times 10^{-3}$ s)						
	BPSK $\frac{1}{2}$	QPSK $\frac{1}{2}$	QPSK $\frac{3}{4}$	16QAM $\frac{1}{2}$	16QAM $\frac{3}{4}$	64QAM $\frac{2}{3}$	64QAM $\frac{3}{4}$
0.8	11.5	8.5	7.3	5.1	4.6	3.7	3.5
0.9	21.1	15.6	13.4	9.3	8.4	6.8	6.3

(Sumber: Perhitungan)

Tabel 4.25 Hasil Perhitungan Delay MAN untuk Wilayah Sub Urban

Faktor Utilisasi	Delay MAN ($\times 10^{-3}$ s)						
	BPSK $\frac{1}{2}$	QPSK $\frac{1}{2}$	QPSK $\frac{3}{4}$	16QAM $\frac{1}{2}$	16QAM $\frac{3}{4}$	64QAM $\frac{2}{3}$	64QAM $\frac{3}{4}$
0.1	4.1	3.0	2.6	1.8	1.7	1.3	1.2
0.2	4.4	3.2	2.8	1.9	1.8	1.4	1.3
0.3	4.7	3.5	3.0	2.1	1.9	1.5	1.4
0.4	5.2	3.8	3.3	2.3	2.1	1.7	1.6
0.5	5.8	4.3	3.7	2.6	2.3	1.9	1.7
0.6	6.8	5.0	4.3	3.0	2.7	2.2	2.0
0.7	8.4	6.2	5.3	3.7	3.3	2.7	2.5
0.8	11.5	8.5	7.3	5.1	4.6	3.7	3.5
0.9	21.1	15.6	13.4	9.3	8.4	6.8	6.3

(Sumber: Perhitungan)

Tabel 4.26 Hasil Perhitungan Delay MAN untuk Wilayah Rural

Faktor Utilisasi	Delay MAN (ms)						
	BPSK $\frac{1}{2}$	QPSK $\frac{1}{2}$	QPSK $\frac{3}{4}$	16QAM $\frac{1}{2}$	16QAM $\frac{3}{4}$	64QAM $\frac{2}{3}$	64QAM $\frac{3}{4}$
0.1	4.1	3.1	2.6	1.8	1.7	1.3	1.3
0.2	4.4	3.3	2.8	2.0	1.8	1.4	1.3
0.3	4.8	3.5	3.0	2.1	1.9	1.5	1.4
0.4	5.2	3.9	3.3	2.3	2.1	1.7	1.7
0.5	5.8	4.3	3.7	2.6	2.3	1.9	1.8
0.6	6.8	5.0	4.3	3.0	2.7	2.2	2.0
0.7	8.4	6.2	5.3	3.7	3.4	2.7	2.5
0.8	11.6	8.6	7.3	5.1	4.6	3.7	3.5
0.9	21.1	15.6	13.4	9.4	8.4	6.8	6.3

(Sumber: Perhitungan)

Delay end to end

Dari perhitungan *delay* MAN dan *delay* CODEC akan menghasilkan *delay end to end* sesuai dengan persamaan (2-31). *Delay end to end* untuk tipe modulasi BPSK 1/2 pada daerah urban adalah:

$$t_{end\ to\ end} = t_{CODEC} + 2t_{MAN} = 0.3015\ ms + 2 \times 4.1 \times 10^{-3}s = 0.3097\ s$$

Tabel 4.27 Hasil Perhitungan *Delay end to end* untuk Wilayah Urban

Faktor Utilisasi	Delay end to end (s)						
	BPSK 1/2	QPSK 1/2	QPSK 3/4	16QAM 1/2	16QAM 3/4	64QAM 2/3	64QAM 3/4
0.1	0.3097	0.3076	0.3067	0.3052	0.3048	0.3042	0.3040
0.2	0.3103	0.3080	0.3071	0.3054	0.3050	0.3043	0.3041
0.3	0.3109	0.3085	0.3075	0.3057	0.3053	0.3045	0.3043
0.4	0.3118	0.3092	0.3081	0.3061	0.3057	0.3048	0.3046
0.5	0.3131	0.3101	0.3089	0.3067	0.3062	0.3053	0.3050
0.6	0.3150	0.3115	0.3101	0.3075	0.3069	0.3059	0.3056
0.7	0.3182	0.3139	0.3121	0.3089	0.3082	0.3069	0.3065
0.8	0.3246	0.3186	0.3161	0.3117	0.3107	0.3089	0.3084
0.9	0.3437	0.3327	0.3282	0.3202	0.3184	0.3151	0.3141

(Sumber: Perhitungan)

Tabel 4.28 Hasil Perhitungan *Delay end to end* untuk Wilayah Sub Urban

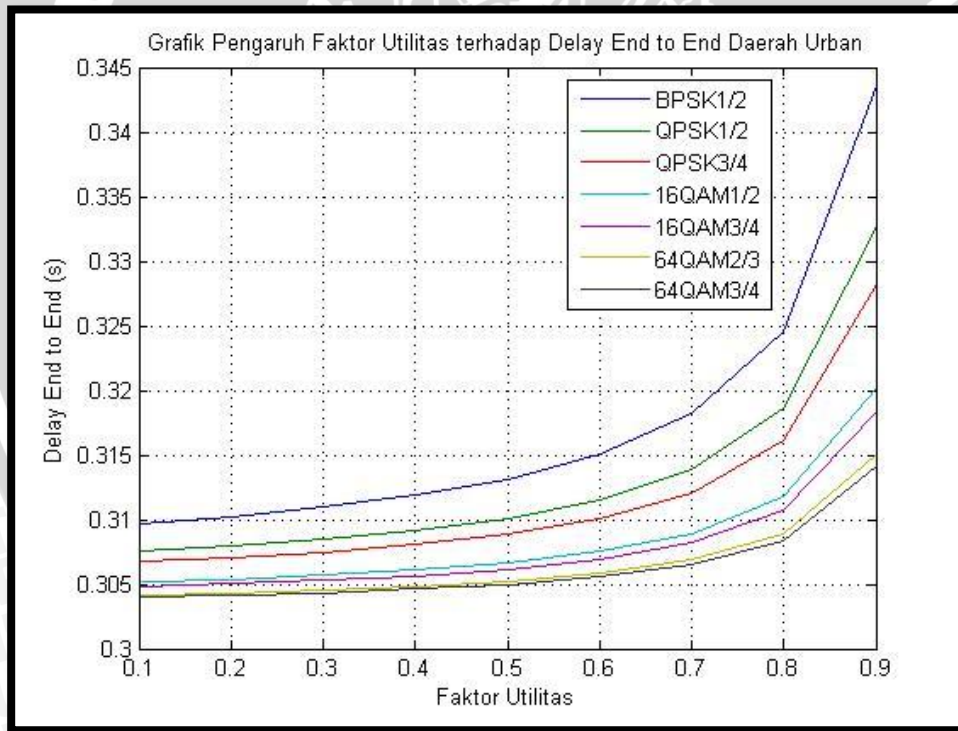
Faktor Utilisasi	Delay end to end (ms)						
	BPSK 1/2	QPSK 1/2	QPSK 3/4	16QAM 1/2	16QAM 3/4	64QAM 2/3	64QAM 3/4
0.1	0.3097	0.3076	0.3067	0.3052	0.3048	0.3042	0.3040
0.2	0.3103	0.3080	0.3071	0.3054	0.3050	0.3043	0.3041
0.3	0.3109	0.3085	0.3075	0.3057	0.3053	0.3045	0.3043
0.4	0.3118	0.3092	0.3081	0.3061	0.3057	0.3048	0.3046
0.5	0.3131	0.3101	0.3089	0.3067	0.3062	0.3053	0.3050
0.6	0.3150	0.3115	0.3101	0.3075	0.3069	0.3059	0.3056
0.7	0.3182	0.3139	0.3121	0.3089	0.3082	0.3069	0.3065
0.8	0.3246	0.3186	0.3161	0.3117	0.3107	0.3089	0.3084
0.9	0.3437	0.3327	0.3282	0.3202	0.3184	0.3151	0.3141

(Sumber: Perhitungan)

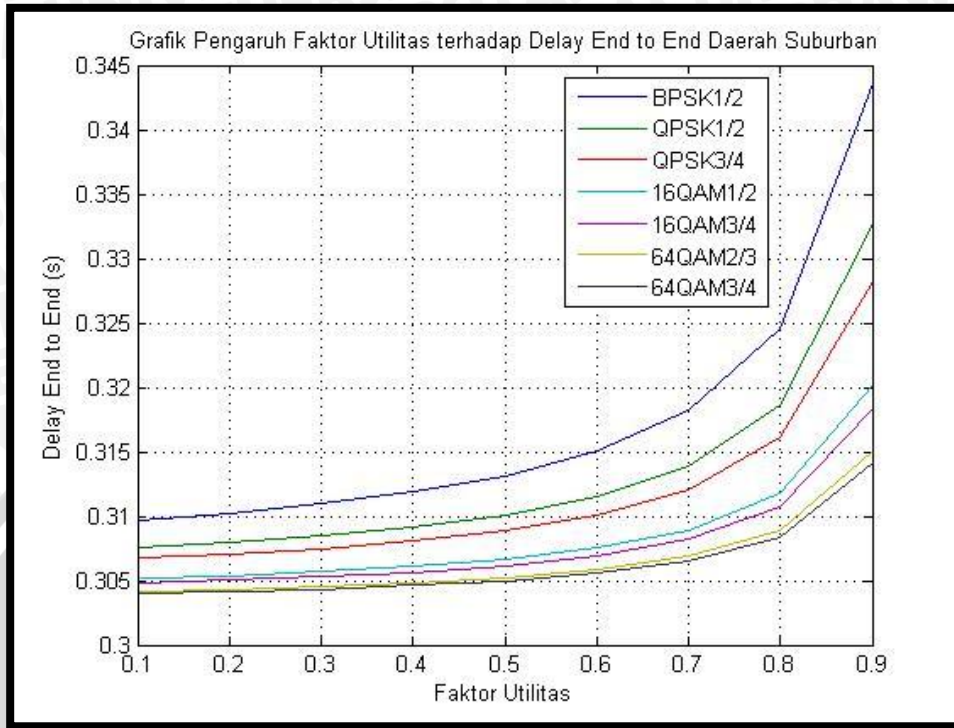
Tabel 4.29 Hasil Perhitungan *Delay end to end* untuk Wilayah Rural

Faktor Utilisasi	Delay <i>Delay end to end</i> (s)						
	BPSK ½	QPSK ½	QPSK ¾	16QAM 1/2	16QAM 3/4	64QAM 2/3	64QAM 3/4
0.1	0.3098	0.3076	0.3068	0.3052	0.3048	0.3042	0.3040
0.2	0.3103	0.3080	0.3071	0.3054	0.3051	0.3044	0.3042
0.3	0.3110	0.3085	0.3075	0.3057	0.3053	0.3046	0.3044
0.4	0.3119	0.3092	0.3081	0.3061	0.3057	0.3049	0.3046
0.5	0.3132	0.3102	0.3089	0.3067	0.3062	0.3053	0.3050
0.6	0.3151	0.3116	0.3101	0.3075	0.3070	0.3059	0.3056
0.7	0.3183	0.3139	0.3122	0.3089	0.3082	0.3069	0.3065
0.8	0.3246	0.3186	0.3162	0.3118	0.3108	0.3090	0.3084
0.9	0.3437	0.3327	0.3283	0.3202	0.3184	0.3151	0.3141

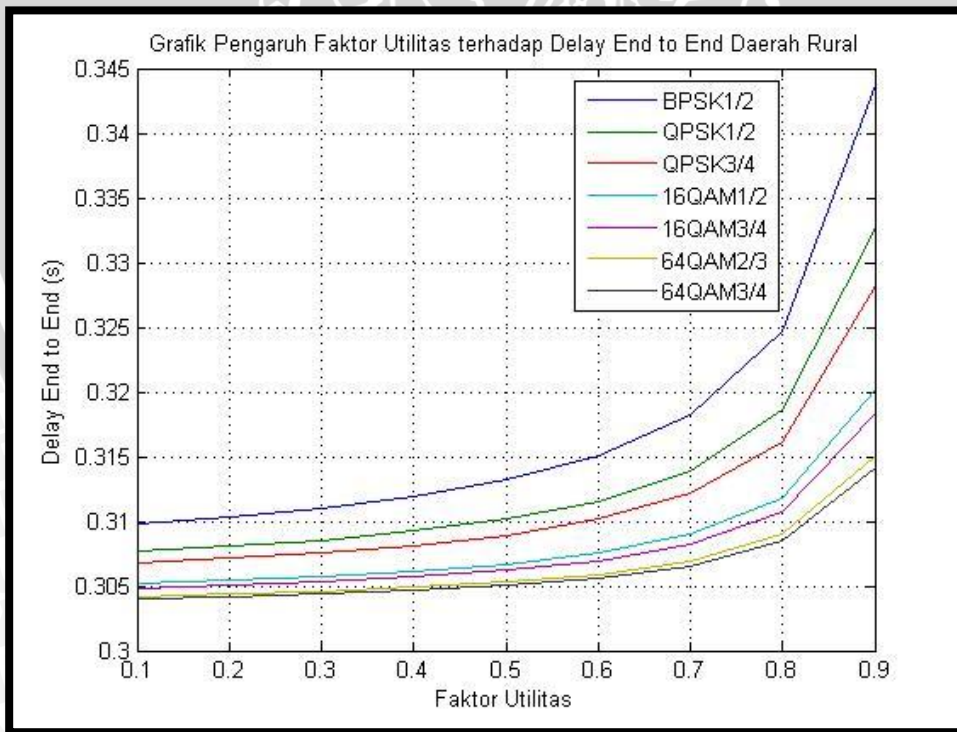
(Sumber: Perhitungan)



Gambar 4.4 Grafik pengaruh faktor utilitas terhadap *delay end to end* daerah urban



Gambar 4.5 Grafik pengaruh faktor utilitas terhadap *delay end to end* daerah suburban



Gambar 4.6 Grafik pengaruh faktor utilitas terhadap *delay end to end* daerah rural

1. Penggunaan teknik modulasi menentukan jauh tidaknya jarak jangkauan antara *Base Station* dan *Subscriber Station*. Modulasi BPSK dengan *coding rate* $\frac{1}{2}$ mempunyai *coverage area* yang paling jauh, sedangkan modulasi 64QAM dengan *coding rate* $\frac{3}{4}$ mempunyai *coverage area* yang paling kecil. Semakin jauh jarak antara *Base Station* dan *Subscriber Station* mengakibatkan *delay end-to-end* semakin besar karena waktu yang digunakan paket saat melakukan transmisi semakin besar. Hal tersebut dapat dilihat dari meningkatnya *delay* transmisi seiring dengan penambahan jarak jangkauan. Jarak jangkauan BS yang terkecil 901.18 m menggunakan modulasi 64QAM $\frac{3}{4}$ pada daerah urban dengan *delay end to end* sebesar 304.0 ms sedangkan jarak jangkauan terjauh menggunakan modulasi BPSK $\frac{1}{2}$ pada daerah rural 13346.97 m dengan *delay end to end* 343.7 ms.
2. Nilai *delay* yang dihasilkan pada transmisi *video conference* pada system WiMAX dengan menggunakan jenis modulasi BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM memenuhi standar ITU.T untuk *video conference*.
3. Dari hasil analisis nilai *delay*, bahwa untuk jarak maksimum area urban, sub urban, rural pada jaringan *mobile* WiMAX, diperoleh nilai *delay* sesuai dengan standar *video conference* ITU.T G.114.
4. Faktor utilisasi mempengaruhi besar kecilnya *delay end to end*, pada semua modulasi semakin besar nilai faktor utilisasi akan mengakibatkan besarnya *delay*, hal ini dikarenakan faktor utilisasi menandakan rasio banyaknya pemakan pada jaringan tersebut dalam waktu yang sama. Jadi semakin banyak user yang melakukan *video conferencing* dalam waktu bersamaan, maka akan menurunkan kualitas dari gambar maupun suara.

4.7 Analisis *Throughput* pada jaringan *mobile WiMAX*

Besarnya *throughput* salah satunya dipengaruhi oleh parameter probabilitas *packet loss*, perhitungan *packet loss* ditentukan berdasarkan probabilitas *packet loss video conference* dan jaringan.

1) Probabilitas *Packet loss video conference*

Perhitungan *packet loss video conference* dipengaruhi oleh BER standar *video conference* 10^{-4} (Fluckiger, 1995), secara matematis dituliskan sesuai dengan persamaan berikut:

$$\rho_{vicon} = \rho_b = 10^{-4}$$

2) Probabilitas *packet loss* jaringan

Perhitungan *packet loss* jaringan WiMAX untuk tipe modulasi BPSK $\frac{1}{2}$ sesuai dengan persamaan berikut:

$$\rho_{BPSK\ 1/2} = P_{BPSK\ 1/2} = 1.013058 \times 10^{-2}$$

Maka probabilitas *packet loss* total untuk modulasi BPSK $\frac{1}{2}$ adalah

$$\begin{aligned} \rho_{total} &= 1 - \left[(1 - \rho_{vicon}) \left(1 - \rho_{BPSK\ \frac{1}{2}} \right) \right] \\ &= 1 - [(1 - 10^{-4})(1 - 0.0069)] = 0.0079 \end{aligned}$$

Tabel 4.30 Hasil Perhitungan Probabilitas *Packet loss*

Tipe Modulasi	BER	ρ_{total}
BPSK $\frac{1}{2}$	0.0069	0.0079
QPSK $\frac{1}{2}$	1.0623×10^{-5}	0.0010
QPSK $\frac{3}{4}$	2.5893×10^{-7}	0.0010
16QAM $\frac{1}{2}$	0.0043	0.0053
16QAM $\frac{3}{4}$	0.0020	0.0030
64QAM $\frac{2}{3}$	0.0257	0.0267
64QAM $\frac{3}{4}$	0.0214	0.0224

(Sumber: Perhitungan)

Dari nilai probabilitas *packet loss* diatas, maka nilai *throughput* dapat diketahui. Nilai konstanta propagasi dengan jarak SS-BS 2176.66 m didaerah urban dan menggunakan modulasi BPSK 1/2 adalah:

$$\alpha = \left(1 + \frac{2t_{prop} + 2t_{trans}}{t_{trans}}\right) = \left(1 + \frac{2 \times 0.00726 \times 10^{-3}s + 2 \times 1.9 \times 10^{-3}s}{1.9 \times 10^{-3}s}\right) = 3.0014$$

Sehingga nilai *throughput* dapat diketahui dengan menggunakan persamaan 2.36:

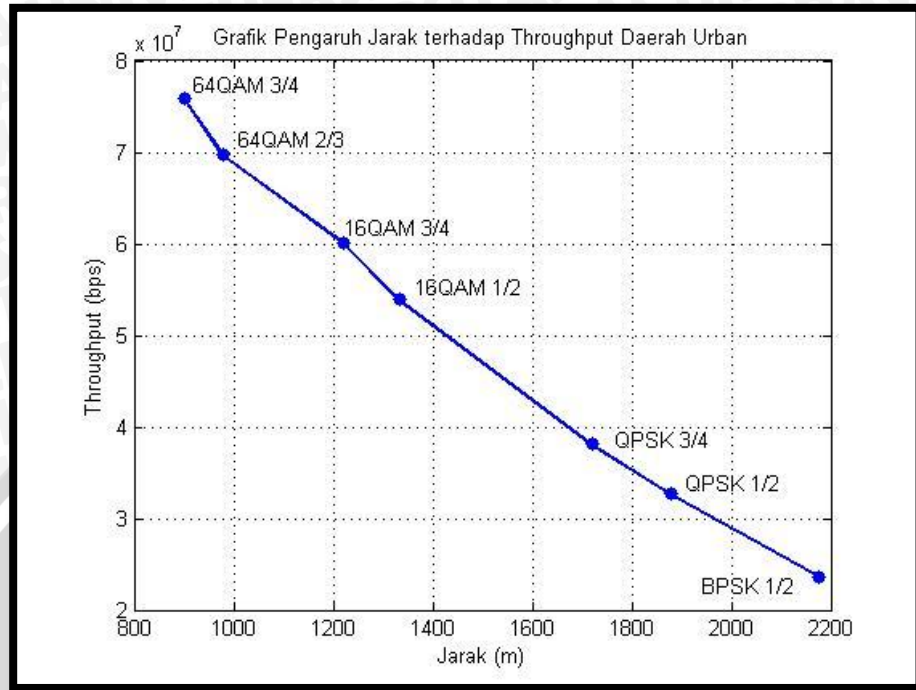
$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{(1 - \rho)}{t_{trans}[1 + (\alpha - 1)\rho]} \\ &= \frac{(1 - 0.0079)}{1.9 \times 10^{-3}s[1 + (3.0014 - 1)0.0079]} \\ &= 23.307 \text{ Mbps} \end{aligned}$$

Dengan menggunakan cara yang sama, akan didapatkan besar nilai *throughput* untuk tiap modulasi yang berbeda pada daeran urban, sub urban dan rural yang ditunjukkan pada table berikut:

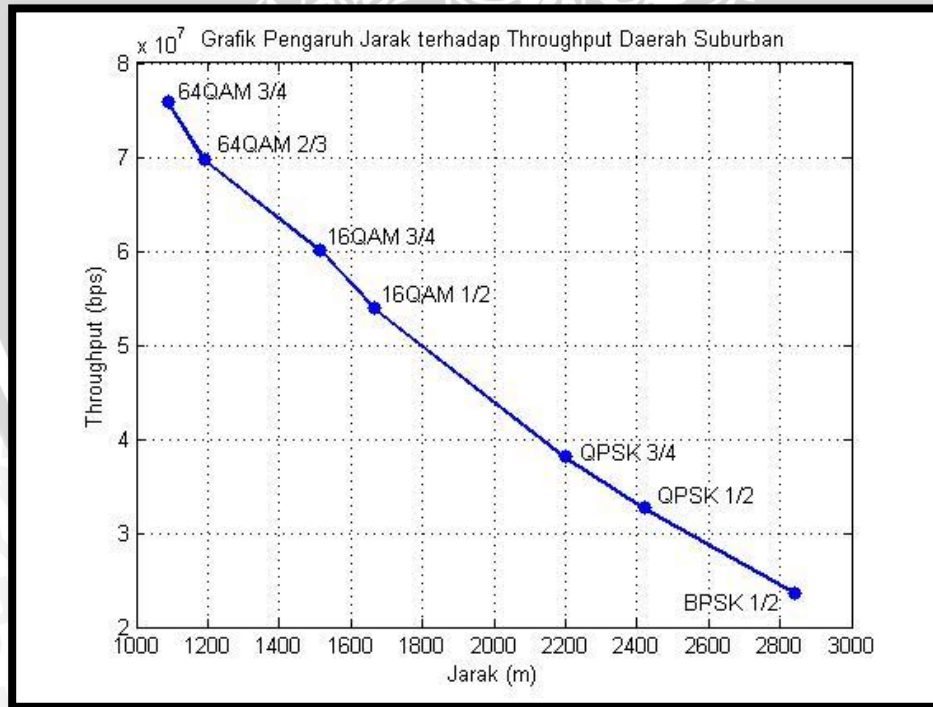
Tabel 4.31 Hasil Perhitungan *Throughput*

Type Modulasi	Throughput (Mbps)		
	Urban	Sub Urban	Rural
BPSK 1/2	23.307	23.307	23.300
QPSK 1/2	32.197	32.197	32.196
QPSK 3/4	37.565	37.565	37.563
16QAM 1/2	53.116	53.115	53.102
16QAM 3/4	59.221	59.220	59.212
64QAM 2/3	68.670	68.666	68.589
64QAM 3/4	74.730	74.726	74.657

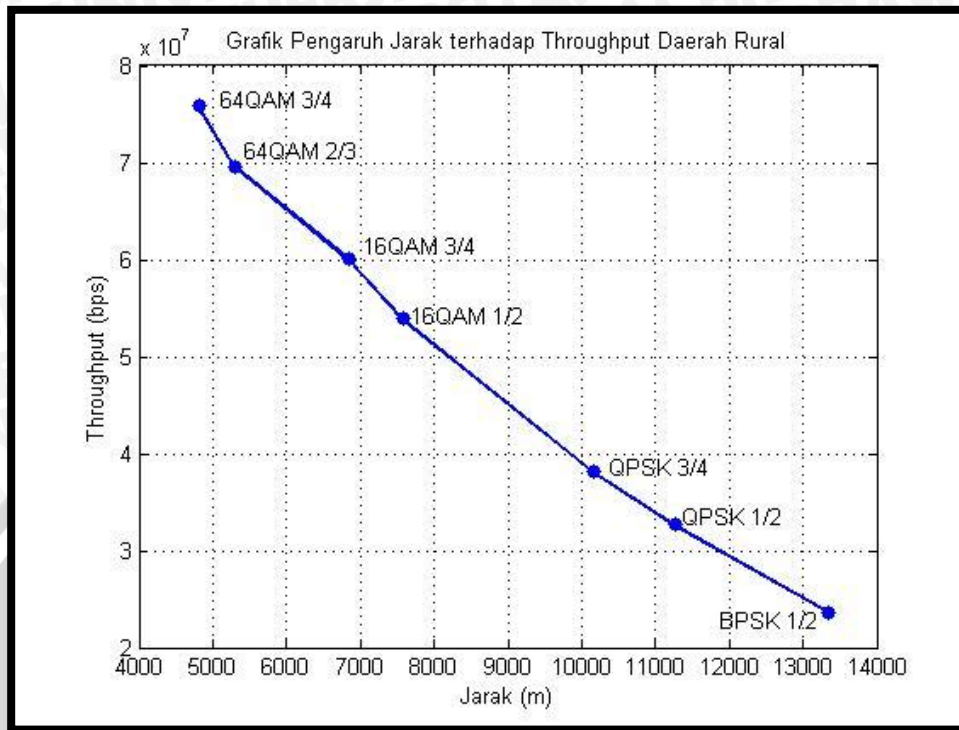
(Sumber: Perhitungan)



Gambar 4.7 Grafik pengaruh jarak terhadap *throughput* daerah urban



Gambar 4.8 Grafik pengaruh jarak terhadap *throughput* daerah sub urban



Gambar 4.9 Grafik pengaruh jarak terhadap *throughput* daerah rural

1. Nilai *throughput* terkecil pada wilayah urban terjadi pada penggunaan modulasi BPSK $\frac{1}{2}$ = 23.307 Mbps, pada wilayah sub urban dengan modulasi BPSK $\frac{1}{2}$ = 23.307 Mbps dan wilayah rural dengan modulasi BPSK $\frac{1}{2}$ = 23.300 Mbps dan nilai *throughput* terbesar terjadi pada penggunaan modulasi 64QAM $\frac{3}{4}$ = 74.730 Mbps, pada wilayah sub urban dengan modulasi 64QAM $\frac{3}{4}$ = 74.726 Mbps dan wilayah rural dengan modulasi 64 QAM $\frac{3}{4}$ = 74.657 Mbps.
2. Penggunaan modulasi mempengaruhi jauh tidaknya jarak jangkauan BS dan SS. Semakin jauh jarak jangkauan BS-SS maka akan menurunkan nilai *throughput* sistem sehingga informasi berupa *video* yang dikirimkan memiliki kualitas yang kurang baik dibandingkan dengan jarak jangkau BS-SS yang dekat.