

BAB V

HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1 Umum

Analisis performansi yang dilakukan pada bab ini berdasarkan pada hasil simulasi yang dilakukan dengan menggunakan *network simulator* OPNET Modeler v.14.5 pada jaringan *mobile* WiMAX yang diimplementasikan dengan layanan VoIP. Data hasil simulasi menggunakan OPNET Modeler diperoleh dengan menggunakan format *website report*, data hasil simulasi secara otomatis dihitung dan ditampilkan dalam nilai rata-rata pada rentang waktu simulasi yang telah ditentukan.

Pada bab ini juga akan ditampilkan hasil analisis performansi VoIP melalui jaringan *mobile* WiMAX dengan menggunakan analisis perhitungan yang mengacu pada skripsi yang berjudul *Performansi Voice over Internet Protocol (VoIP) Melalui Mobile WiMAX* karya Widhi Setya Wahyudi. Hal ini dilakukan sebagai perbandingan terhadap hasil simulasi dengan menggunakan *network simulator* OPNET Modeler v.14.5

5.2 Analisis perhitungan VoIP melalui *Mobile* WiMAX

Pada analisis performansi VoIP melalui *mobile* WiMAX dihitung beberapa parameter yang akan digunakan untuk proses perhitungan parameter performansi VoIP melalui *mobile* WiMAX. Parameter-parameter perhitungan ini meliputi perhitungan kebutuhan *bandwidth* dalam VoIP, *path loss*, *signal to noise ratio* (SNR), kapasitas kanal, serta jarak jangkauan antara *base station* dan *subscriber station*.

5.2.1 Analisis Paket Data Aplikasi VoIP

Untuk analisis performansi VoIP melalui *mobile* WiMAX digunakan *Audio codec* G.711 dengan *bandwidth* 64 Kbps dan *frame rate* 10 ms. Untuk mencari nilai *payload* maka digunakan Persamaan 2.1:

$$P_{LA} = B_{\text{codec}} \times \text{frame rate} = 64 \times 10^3 \text{ bps} \times 10 \times 10^{-3} \text{ s} = 640 \text{ bit}$$

Maka *Payload* VoIP = 640 bit = 80 byte

Setelah diketahui besar *payload* paket data pada audio maka banyaknya bit yang terisi dalam paket VoIP dapat dihitung dengan Persamaan 2.2 :

$$P_{A\text{-size}} = \text{header}_{\text{UDP/RTP/IP}} + P_{LA} = 320 \text{ bit} + 640 \text{ bit} = 960 \text{ bit}$$

Sedangkan jumlah paket audio yang dihasilkan tiap detik dihitung dengan Persamaan 2.3 :

$$P_A = \frac{B_{\text{codec}}}{P_{LA}} = \frac{64 \times 10^3}{640} = 100 \text{ packet per second}$$

Sehingga *bandwidth* audio dapat dihitung dengan Persamaan 2.4 :

$$B_A = P_{A\text{-size}} \times P_A = 960 \times 100 = 96000 \text{ bit per second} = 96 \text{ Kbps}$$

5.2.2 Analisis Path Loss

Path loss mencakup semua pelemahan yang diperkirakan akan dialami sinyal ketika berjalan dari *base station* ke *subscriber station*. *Path loss* yang terjadi pada sinyal yang diterima dapat ditentukan melalui suatu model propagasi tertentu. Dengan daya penerima minimum yang disesuaikan dengan Peraturan Dirjen Pos dan Telekomunikasi pada Tabel 2.5, maka *path loss* referensi dapat dihitung dengan Persamaan 2.5 :

$$P_L = P_t + G_t + G_r - P_r = 35 + 16 + 0 - -88 = 139 \text{ dB}$$

Jadi dengan daya penerima minimum QPSK $\frac{1}{2}$ sebesar -88 dB, dengan daya maksimum BS 35 dBm, penguatan antenna BS 16 dBi maka didapatkan *path loss* sebesar 139 dB. Dengan melakukan perhitungan pada tipe modulasi yang lain pada kondisi yang sama akan didapatkan *path loss* saluran yang dilihat dalam Tabel 5.1

Tabel 5.1 Hasil perhitungan *path loss*

Tipe Modulasi	Batas Daya Terima Minimum (dBm)	Path Loss (dB)
QPSK $\frac{1}{2}$	-88	139
QPSK $\frac{3}{4}$	-86	137
16 QAM $\frac{1}{2}$	-81	132
16 QAM $\frac{3}{4}$	-79	130
64 QAM $\frac{1}{2}$	-74	125
64 QAM $\frac{3}{4}$	-73	124

5.2.3 Analisis Signal to noise ratio (SNR)

Sesuai dengan yang telah dijelaskan di Bab II, bahwa *mobile WiMAX* dengan spesifikasi IEEE 802.16e dapat menggunakan teknik modulasi QPSK, 16 QAM, dan 64 QAM. Jumlah *subcarrier* yang akan digunakan dalam analisis ini adalah 512.

Sebelum melakukan perhitungan *signal to noise ratio* (SNR), perlu menghitung beberapa parameter yang meliputi laju data *subcarrier*, durasi *subcarrier*, durasi *cyclic prefix subcarrier*, durasi *symbol OFDMA subcarrier* dan *bandwidth* sistem. Dengan menggunakan teknik modulasi QPSK, diperoleh laju data untuk masing-masing *subcarrier* yang dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$R_{sub} = \frac{R_{tot}}{N} = \frac{3,17 \text{ Mbps}}{512} = 0,0062 \text{ Mbps}$$

Dengan cara yang sama diperoleh nilai laju data pada kanal 5 MHz untuk berbagai jenis tipe modulasi lain yang ditunjukkan pada Tabel 5.2 berikut :

Tabel 5.2 Hasil analisis laju data dari *subcarrier* 512

Tipe Modulasi	Laju Data pada Kanal 5 MHz (Mbps)	R_{sub} (Mbps)
QPSK $\frac{1}{2}$	3.17	0.0062
QPSK $\frac{3}{4}$	4.75	0.0093
16 QAM $\frac{1}{2}$	6.34	0.0124
16 QAM $\frac{3}{4}$	9.5	0.0186
64 QAM $\frac{1}{2}$	9.5	0.0186
64 QAM $\frac{3}{4}$	14.26	0.0279

Durasi *subcarrier* 512 dengan nilai M pada QPSK adalah $2^2 = 4$, adalah :

$$T_{sub} = \frac{2}{R_{sub}} = \frac{2}{0,0062 \times 10^6} = 323,0284 \mu s$$

Dengan cara yang sama diperoleh nilai laju data pada kanal 5 MHz untuk berbagai jenis tipe modulasi lain yang ditunjukkan pada Tabel 5.3 berikut :

Tabel 5.3 Hasil durasi dari *subcarrier* 512

Tipe Modulasi	Laju Data pada Kanal 5 MHz (Mbps)	T_{sub} (μs)
QPSK $\frac{1}{2}$	3.17	323.0284
QPSK $\frac{3}{4}$	4.75	215.5789
16 QAM $\frac{1}{2}$	6.34	323.0284
16 QAM $\frac{3}{4}$	9.5	215.5789
64 QAM $\frac{1}{2}$	9.5	323.3684
64 QAM $\frac{3}{4}$	14.26	215.4278

Dengan mengambil nilai *cyclic prefix* sebesar $1/8$ untuk mengurangi *Intersymbol Interference* (ISI) dan *Interchannel Interference* (ICI), maka durasi *cyclic prefix* dapat diketahui yaitu:

$$T_{cp} = \frac{1}{8} \times T_{sub} = \frac{1}{8} \times (323.0284 \times 10^{-6}) = 40.37855 \mu s$$

Dengan cara yang sama diperoleh durasi *cyclic prefix subcarrier* 512 pada kanal 5 MHz untuk berbagai jenis tipe modulasi lain yang ditunjukkan pada Tabel 5.4 berikut :

Tabel 5.4 Hasil durasi *cyclic prefix* dari *subcarrier* 512

Tipe Modulasi	Laju Data (Mbps) pada Kanal 5 MHz	T_{cp} (μs)
QPSK $\frac{1}{2}$	3.17	40.37855
QPSK $\frac{3}{4}$	4.75	26.94736
16 QAM $\frac{1}{2}$	6.34	40.37855
16 QAM $\frac{3}{4}$	9.5	26.94736
64 QAM $\frac{1}{2}$	9.5	40.42105
64 QAM $\frac{3}{4}$	14.26	26.92848

Sehingga durasi simbol OFDMA menjadi :

$$T_s = T_{sub} - T_{cp} = (323.0284 - 40.37855) \times 10^{-6} = 282.6499 \mu s$$

Dengan cara yang sama diperoleh durasi simbol OFDMA *subcarrier* 512 pada kanal 5 MHz untuk berbagai jenis tipe modulasi lain yang ditunjukkan pada Tabel 5.5 berikut :

Tabel 5.5 Hasil durasi simbol OFDMA dari *subcarrier* 512

Tipe Modulasi	Laju Data pada Kanal 5 MHz (Mbps)	T_s (μs)
QPSK $\frac{1}{2}$	3.17	282.6499
QPSK $\frac{3}{4}$	4.75	188.6315
16 QAM $\frac{1}{2}$	6.34	282.6499
16 QAM $\frac{3}{4}$	9.5	188.6315
64 QAM $\frac{1}{2}$	9.5	282.9474
64 QAM $\frac{3}{4}$	14.26	188.4993

Berdasarkan data yang didapatkan dari WiMAX Forum, durasi simbol pada sistem *mobile* WiMAX tidak boleh kurang dari 91,4 μ s. Oleh karena itu, berdasarkan hasil perhitungan durasi simbol OFDMA yang dapat dilihat pada Tabel 5.5 batas minimum jumlah *subcarrier* 512 telah memenuhi standar WiMAX Forum.

Bandwidth subcarrier dengan durasi simbol OFDMA $T_s = 282.6499 \mu$ s dapat ditentukan dengan persamaan berikut :

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

$$\Delta f = \frac{1}{282.6499 \times 10^{-6}} = 0.0032 \text{ MHz}$$

Dengan cara yang sama diperoleh *bandwidth subcarrier* 512 pada kanal 5 MHz untuk berbagai jenis tipe modulasi yang lain. Hasil analisis tersebut ditunjukkan pada Tabel 5.6 berikut :

Tabel 5.6 Hasil *bandwidth* dari *subcarrier* 512

Type Modulasi	Laju Data pada Kanal 5 MHz (Mbps)	B
QPSK 1/2	3.17	0.0035
QPSK 3/4	4.75	0.0053
16 QAM 1/2	6.34	0.0035
16 QAM 3/4	9.5	0.0053
64 QAM 1/2	9.5	0.0035
64 QAM 3/4	14.26	0.0053

bandwidth sistem untuk jumlah *subcarrier* 512 dan durasi *subcarrier* $T_{sub} = 282.6499 \mu$ s dapat ditentukan dengan persamaan berikut :

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

$$B_{sistem} = \frac{2}{323.0284 \times 10^{-6}} + \frac{N-1}{(1-\frac{1}{32})323.0284 \times 10^{-6}}$$

$$B_{sistem} = 1.8141 \text{ MHz}$$

Dengan cara yang sama diperoleh *bandwidth subcarrier* 512 pada kanal 5 MHz untuk berbagai jenis tipe modulasi lain yang ditunjukkan pada Tabel 5.7 berikut:

Tabel 5.7 Hasil *bandwidth* sistem dari *subcarrier* 512

Tipe Modulasi	Laju Data pada Kanal 5 MHz (Mbps)	B_{sistem} (MHz)
QPSK $\frac{1}{2}$	3.17	1.6391
QPSK $\frac{3}{4}$	4.75	2.4561
16 QAM $\frac{1}{2}$	6.34	1.6391
16 QAM $\frac{3}{4}$	9.5	2.4561
64 QAM $\frac{1}{2}$	9.5	1.6374
64 QAM $\frac{3}{4}$	14.26	2.4578

Perhitungan nilai SNR dilakukan pada kanal *wireless* yang terdiri dari kanal AWGN dan kanal *fading*. Untuk menganalisis SNR diperlukan perhitungan nilai rugi-rugi propagasi ruang bebas yang telah dianalisis diatas.

Noise AWGN untuk laju data 3,17 Mbps dan jumlah *subcarrier* 512, dengan *bandwidth* sistem sebesar $B_{sistem} = 1.6391$ MHz. Sehingga dapat dihitung besarnya daya noise pada kanal AWGN dengan menggunakan persamaan 2.7, sebesar :

$$N_o = 10 \log k.T + 10 \log B + NF$$

$$N_o = 10 \log(1,38 \times 10^{-23} \times 300) + 10 \log(1.6391 \times 10^6) + 7 = -134.243 \text{ dBm}$$

Dengan cara yang sama diperoleh *noise subcarrier* 512 pada kanal 5 MHz untuk berbagai jenis tipe modulasi lainyang ditunjukkan pada Tabel 5.8 berikut :

Tabel 5.8 Hasil *noise* dari *subcarrier* 512

Tipe Modulasi	Laju Data pada Kanal 5 MHz (Mbps)	N_o (dBm)
QPSK $\frac{1}{2}$	3.17	-134.243
QPSK $\frac{3}{4}$	4.75	-132.487
16 QAM $\frac{1}{2}$	6.34	-134.243
16 QAM $\frac{3}{4}$	9.5	-132.487
64 QAM $\frac{1}{2}$	9.5	-134.248
64 QAM $\frac{3}{4}$	14.26	-132.484

Sehingga diperoleh *signal-to-noise ratio* dengan menggunakan Persamaan 2.6 :

$$SNR = P_r - N_o = -88 - (-134,6839) = 46.6839 \text{ dB}$$

Dengan cara yang sama diperoleh *signal to noise ratio subcarrier* 512 pada kanal 5 MHz untuk berbagai jenis tipe modulasi lain yang ditunjukkan pada Tabel 5.9 berikut :

Tabel 5.9 Hasil *signal to noise ratio* dari *subcarrier* 512

Tipe Modulasi	Laju Data pada Kanal 5 MHz (Mbps)	P_r (dB)	SNR (dB)	SNR (Watt)
QPSK $\frac{1}{2}$	3.17	-88	46.2434	4.2105×10^4
QPSK $\frac{3}{4}$	4.75	-86	46.4871	4.4535×10^4
16 QAM $\frac{1}{2}$	6.34	-81	53.2434	2.1103×10^5
16 QAM $\frac{3}{4}$	9.5	-79	53.4871	2.2321×10^5
64 QAM $\frac{1}{2}$	9.5	-74	60.2480	1.0588×10^6
64 QAM $\frac{3}{4}$	14.26	-73	59.4840	8.8798×10^5

Sehingga diperoleh SNR_{sistem} dengan Persamaan 2.8, berikut :

$$SNR_{sistem} = \left(\alpha_{cp} \right)^{-1} SNR = \left(\frac{1}{8} \right)^{-1} 4.2105 \times 10^4 = 3.6842 \times 10^4$$

Dengan cara yang sama diperoleh *signal to noise ratio* sistem untuk berbagai jenis tipe modulasi lain yang ditunjukkan pada Tabel 5.10 berikut :

Tabel 5.10 Hasil *signal to noise ratio* sistem dari *subcarrier* 512

Tipe Modulasi	Laju Data (Mbps) pada Kanal 5 MHz	P_r (dB)	SNR_{sistem}
QPSK $\frac{1}{2}$	3.17	-88	3.6842×10^4
QPSK $\frac{3}{4}$	4.75	-86	3.8968×10^4
16 QAM $\frac{1}{2}$	6.34	-81	1.8465×10^5
16 QAM $\frac{3}{4}$	9.5	-79	1.9531×10^5
64 QAM $\frac{1}{2}$	9.5	-74	9.2642×10^5
64 QAM $\frac{3}{4}$	14.26	-73	7.7698×10^5

5.2.4 Analisis Kapasitas Kanal

Dalam analisis kapasitas kanal dibutuhkan parameter SNR_{sistem} yang telah dihitung sebelumnya. Pada perhitungan kapasitas kanal ini menggunakan teorema Shannon yang terdapat pada Persamaan 2.14. Sehingga kapasitas kanal sistem untuk jumlah subcarrier 512 dengan $SNR_{sistem} = 3.6842 \times 10^4$ adalah sebagai berikut :

$$C = B_{sistem} \cdot \log_2 \left(1 + SNR_{sistem} \right) = 5 \times 10^6 \cdot \log_2 \left(1 + 3.6842 \times 10^4 \right) = 75.846 \text{ Mbps}$$

Dengan cara yang sama diperoleh kapasitas kanal untuk berbagai jenis tipe modulasi lain yang ditunjukkan pada Tabel 5.11 berikut.

Tabel 5.11 Hasil kapasitas kanal dari *subcarrier* 512

Tipe Modulasi	Laju Data pada Kanal 5 MHz (Mbps)	C (Mbps)
QPSK $\frac{1}{2}$	3.17	75.846
QPSK $\frac{3}{4}$	4.75	76.250
16 QAM $\frac{1}{2}$	6.34	87.472
16 QAM $\frac{3}{4}$	9.5	87.877
64 QAM $\frac{1}{2}$	9.5	99.107
64 QAM $\frac{3}{4}$	14.26	97.838

5.2.5 Analisis jarak jangkauan *base station* ke *subscriber station*

Pada analisis performansi VoIP melalui *mobile* WiMAX diperlukan model propagasi, dimana model propagasi ini akan menentukan jarak cakupan dari *base station* ke *subscriber station*. Dengan jarak referensi *free space* d_0 yang digunakan pada standar IEEE 802.16 rev E adalah 100 m, maka jarak jangkauan *base station* ke *subscriber station* dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 2.10 :

Dengan $\lambda = 0.13043$ m, maka *path loss* referensi :

$$A = 20 \log \frac{4\pi 100}{0.13043} = 20 \log 96.296 = 20 \times 3.9836 = 79.672 \text{ dB}$$

Pada Analisis performansi ini, sinyal diasumsikan pada lingkungan NLOS, posisi *base station* dalam keadaan tetap (tidak bergerak) dan posisi *subscriber station* dalam keadaan bergerak pada daerah suburban. Maka kriteria yang digunakan dalam kondisi *path loss* ini adalah sesuai dengan kondisi *path loss* menengah atau tipe suburban.

Eksponen *path loss* pada kondisi daerah suburban untuk kategori B dengan menggunakan tabel dapat dihitung dengan Persamaan 2.12 :

$$\gamma = a - b \cdot h_b + \frac{c}{h_b} = 4 - 0.0065 \cdot 32 + \left(\frac{17.1}{32}\right) = 4.3264$$

Koreksi frekuensi pada frekuensi kerja 2,3 GHz, dihitung dengan Persamaan 2.13 :

$$\Delta PL_f = 6 \log\left(\frac{f}{2 \times 10^9}\right) = 6 \log\left(\frac{2,3 \times 10^9}{2 \times 10^9}\right) = 0.3642 \text{ dB}$$

Koreksi tinggi antena dapat dihitung dengan Persamaan 2.14 :

$$\Delta PL_h = -10.8 \log \frac{h}{2} = -10.8 \log \frac{1.5}{2} = 1.3493 \text{ dB}$$

Dengan nilai *path loss* yang telah dihitung pada perhitungan *path loss* sebelumnya, maka jarak jangkau (jarak maksimum antara *base station* dan *subscriber station*) dapat dihitung dengan Persamaan 2.10 :

$$PL = A + 10\gamma \log \frac{d}{d_0} + s + \Delta PL_f + \Delta PL_h$$

$$PL = 79.672 + 10 \times 4.3264 \log \frac{d}{100} + 0.3642 + 1.3493 + 9.6$$

$$PL = 90.9855 + 43.264 \log \frac{d}{100}$$

Nilai *Path loss* untuk teknik modulasi QPSK $\frac{1}{2}$ yang telah dihitung:

$$139 = 90.9855 + 43.264 \log \frac{d}{100}$$

$$30.0146 = 43.264 \log \frac{d}{100} \text{ maka } d = 1287.4 \text{ m}$$

Dengan cara yang sama diperoleh jarak jangkau (jarak antara *base station* dan *subscriber station*) dengan *subcarrier* 512 pada kanal 5 MHz untuk berbagai jenis tipe modulasi lain yang ditunjukkan pada Tabel 5.12 berikut :

Tabel 5.12 Hasil jarak jangkau jarak antara *base station* dan *subscriber station* untuk *subcarrier* 512

Tipe Modulasi	Batas Daya Terima Minimum (dBm)	jarak jangkau (m)
QPSK $\frac{1}{2}$	-88	1287.4
QPSK $\frac{3}{4}$	-86	1157.4
16 QAM $\frac{1}{2}$	-81	886.9724
16 QAM $\frac{3}{4}$	-79	797.4106
64 QAM $\frac{1}{2}$	-74	611.0994
64 QAM $\frac{3}{4}$	-73	579.4257

5.2.6 Analisis performansi VoIP melalui *mobile WiMAX*

5.2.6.1 Analisis *energy Bit to Noise*

Nilai *energy bit to noise* digunakan untuk menilai kualitas sinyal yang dikirim oleh pemancar. dengan :

- *Noise figure* dari perangkat sebesar 7 dB

- P_t , Daya maksimum BS sebesar 35 dBm
- G_t , Penguatan antena BS sebesar 16 dBi
- R yaitu *bit rate* pada modulasi QPSK, 16 QAM dan 64 QAM. Untuk QPSK $\frac{1}{2}$ sebesar 3.17 Mbps. Untuk $R_{(dB)} = 10 \log R_{tot}$
- T_{sistem} adalah temperature sistem yang digunakan sebesar 300^0K

Nilai *noise* telah dihitung dalam perhitungan sebelumnya, maka *energy bit to noise* ($\frac{E_b}{N_0}$) untuk QPSK $\frac{1}{2}$ dapat dihitung dengan Persamaan 2.16 dan diperoleh :

$$\frac{E_b}{N_0} = P_t \text{ dBm} + G_t \text{ dB} - PL \text{ dB} - N_0 \text{ dB} + R \text{ dB}$$

$$\frac{E_b}{N_0} = 35 + 16 - 139 - -134.6839 + 65.0106 = 111.6945 \text{ dB}$$

Dengan cara yang sama diperoleh nilai *energy bit to noise* $\frac{E_b}{N_0}$ dengan *subcarrier* 512 pada kanal 5 MHz untuk berbagai jenis tipe modulasi lain yang ditunjukkan pada Tabel 5.13 berikut.

Tabel 5.13 Hasil *energy bit to noise* $\frac{E_b}{N_0}$ dari *subcarrier* 512

Tipe Modulasi	Laju Data pada Kanal 5 MHz (Mbps)	$\frac{E_b}{N_0}$ dB
QPSK $\frac{1}{2}$	3.17	111.254
QPSK $\frac{3}{4}$	4.75	113.254
16 QAM $\frac{1}{2}$	6.34	121.2643
16 QAM $\frac{3}{4}$	9.5	123.2643
64 QAM $\frac{1}{2}$	9.5	130.0252
64 QAM $\frac{3}{4}$	14.26	131.0252

5.2.6.2 Probabilitas bit salah pada teknik modulasi QPSK

Untuk melakukan perhitungan Probabilitas bit salah pada teknik modulasi QPSK-1/2 yaitu dengan data rate 3.17 Mbps, diperlukan parameter ($\frac{E_b}{N_0}$). Maka kemungkinan kesalahan bit yang terjadi adalah :

$$P_{be} = Q \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right) = Q \left(\sqrt{2 \times 111.254} \right) = Q(14.9167)$$

Dengan nilai (x) adalah (14.9167) maka dimasukkan ke Persamaan 2.17 dan diperoleh :

$$Q x = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \frac{x}{2}$$

$$Q 14.4398 = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \frac{14.9167}{2}$$

Dengan menggunakan program Matlab didapatkan nilai $Q 14.4398$ sebesar 1.2833×10^{-50} maka probabilitas bit yang salah adalah $P_{be} = 1.2833 \times 10^{-50}$

5.2.6.3 Probabilitas bit salah pada teknik modulasi 16 QAM

Pada teknik modulasi 16 QAM yaitu dengan data rate 6.34 Mbps dengan nilai ($\frac{E_b}{N_0}$) sebesar 121.2643 maka kemungkinan kesalahan bit yang terjadi sesuai dengan Persamaan 2.20 adalah :

$$P_{be} = \frac{4}{K} \left(1 - \frac{1}{M} \right) Q \left(\frac{3K}{M-1} \sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right)$$

Dengan :

$$M = 16 ; K = \log_2 M = \log_2 16 = 4$$

$$P_{be} = \frac{4}{4} \left(1 - \frac{1}{16} \right) Q \left(\frac{3 \times 4}{16-1} \times 121.2643 \right) = 1 - \frac{1}{4} Q 9.8494$$

dengan nilai (x) adalah (9.8494) maka dimasukkan ke Persamaan 2.17, diperoleh :

$$Q x = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \frac{x}{2}$$

$$Q 9.8494 = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \frac{9.8494}{2}$$

Dengan menggunakan program Matlab didapatkan $Q 9.8494$ adalah 3.4477×10^{-23} maka $P_{be} = 1 - \frac{1}{4} \times 3.4477 \times 10^{-23} = 2.5858 \times 10^{-23}$. Maka probabilitas bit yang salah adalah $P_{be} = 2.5858 \times 10^{-23}$.

5.2.6.4 Probabilitas bit salah pada teknik modulasi 64 QAM

Pada teknik modulasi 64 QAM yaitu dengan data rate 9.5 Mbps dengan nilai ($\frac{E_b}{N_0}$) sebesar 130.0252 maka kemungkinan kesalahan bit yang terjadi sesuai dengan Persamaan 2.20 adalah :

$$P_{be} = \frac{4}{K} \left(1 - \frac{1}{M} \right) Q \left(\frac{\sqrt{3K E_b}}{M-1 N_0} \right)$$

Dengan :

$$M = 64 ; K = \log_2 M = \log_2 64 = 6$$

$$P_{be} = \frac{4}{6} \left(1 - \frac{1}{64} \right) Q \left(\frac{\sqrt{3 \times 6}}{64-1} \times 130.0252 \right) = \frac{4}{6} \times \left(1 - \frac{1}{8} \right) Q 6.0951$$

Dengan nilai (x) adalah (9.5609) maka dimasukkan ke Persamaan 2.17, diperoleh :

$$Q(x) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{\sqrt{2}} \right)$$

$$Q(6.0951) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{5.9287}{\sqrt{2}} \right)$$

Dengan menggunakan program Matlab nilai $\operatorname{erfc} \left(\frac{6.0951}{\sqrt{2}} \right)$ didapatkan 5.4685 $\times 10^{-10}$. Maka probabilitas bit yang salah adalah $P_{be} = \frac{4}{6} \times \left(1 - \frac{1}{8} \right) \times 5.4685 \times 10^{-10} = 3.1899 \times 10^{-9}$

Dengan cara yang sama diperoleh nilai probabilitas bit yang salah untuk jenis tipe modulasi lain yang ditunjukkan pada Tabel 5.14 berikut.

Tabel 5.14 Hasil probabilitas bit yang salah dari *subcarrier* 512

Tipe Modulasi	Laju Data pada Kanal 5 MHz (Mbps)	probabilitas bit yang salah
QPSK $\frac{1}{2}$	3.17	1.2833×10^{-50}
QPSK $\frac{3}{4}$	4.75	1.271×10^{-51}
16 QAM $\frac{1}{2}$	6,34	2.58578×10^{-23}
16 QAM $\frac{3}{4}$	9.5	1.15245×10^{-23}
64 QAM $\frac{1}{2}$	9.5	3.18996×10^{-10}
64 QAM $\frac{3}{4}$	14.26	2.58008×10^{-10}

5.2.6.5 Analisis *delay end to end*

Pada aplikasi VoIP yang bersifat *full duplex*, maka *delay* dihitung dari dari penerima ke sumber sampai ke penerima yang lain. Untuk analisis jaringan *mobile WiMAX* yang digunakan, maka perhitungan dilakukan untuk mengetahui *delay end to end* aplikasi VoIP melalui *mobile WiMAX* dengan Persamaan 2.23 :

$$t_{end\ to\ end} = t_{codec} + t_{MAN}$$

Dengan : $t_{end\ to\ end} = Delay\ end\ to\ end$

$$t_{codec} = Delay\ codec$$

$$t_{MAN} = Delay\ MAN$$

❖ Delay codec

Delay ini terjadi pada sisi *encoder* terdiri dari waktu untuk mengakumulasi sample suara ke dalam *frame* suara, waktu untuk mengkompresi paket suara, waktu untuk memuat *frame* suara ke dalam paket dan mentransfer paket tersebut ke jaringan *transport* dan *delay hardware* yang bersifat tetap. Delay pada *codec* audio G.711 sebesar 0.75 ms, sehingga *delay codec* ini dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$t_{codec} = 2xt_{audio} = 2x0.75ms = 1.5\ ms$$

❖ Delay MAN

Delay pada MAN merupakan besarnya *delay* yang diperlukan untuk mengirimkan data dari sisi *subscriber station* ke *base station* WiMAX. Delay pada MAN dapat dihitung dengan Persamaan 2.25 sebagai berikut:

$$t_{MAN} = t_{proses} + t_{prop} + t_{trans} + t_w$$

Dengan: $t_{MAN} = Delay\ total\ pada\ MAN\ (ms)$

$$t_{proses} = Delay\ proses\ (ms)$$

$$t_{prop} = Delay\ propagasi\ (ms)$$

$$t_{trans} = Delay\ transmisi\ (ms)$$

$$t_w = Delay\ antrian\ (ms)$$

❖ Delay Proses

Delay proses adalah waktu yang dibutuhkan untuk memproses paket data dan untuk menentukan kemana data tersebut akan diteruskan. Delay proses berupa *delay* enkapsulasi dan *delay* dekapsulasi. Delay enkapsulasi dan *delay* dekapsulasi data melalui jaringan *mobile* WiMAX untuk masing-masing layer dengan menambahkan *header* dan perubahan format data.

Ketika data VoIP (*payload audio*) dikirim dari sumber melewati layer aplikasi menuju layer *transport*, data akan diubah menjadi segmen. Message data ketika melewati *transport* data akan mengalami penambahan *header* RTP dan *header* UDP, sehingga dapat dihitung dengan Persamaan 2.26 :

$$W_{message} = W_{data} + Header_{RTP} = 192 \text{ Byte} + 12 \text{ Byte} = 214 \text{ Byte}$$

Dari layer *transport* segmen ditambahkan dengan *header* UDP karena menggunakan aplikasi yang bersifat *real time*. Karena panjang segmen data tidak melebihi MSS UDP yaitu 1460 Byte, maka segmen tidak difragmentasi.

$$W_{segmen} = W_{message} + Header_{UDP} = 214 \text{ Byte} + 8 \text{ Byte} = 222 \text{ Byte}$$

Dari layer *transport* data dibawa menuju layer *network*, yaitu IP untuk diubah menjadi datagram dengan penambahan *header* IP. Dengan menggunakan Persamaan 2.27 diperoleh :

$$W_{datagram} = W_{segmen} + Header_{IP} = 222 \text{ Byte} + 20 \text{ Byte} = 242 \text{ Byte}$$

Pada segmen datagram tidak melebihi MTU Ethernet, maka datagram IP tidak difragmentasi. Dengan menggunakan Persamaan 2.28 maka *frame-frame* tadi dienkapsulasi dengan rumus :

$$W_{frame} = W_{datagram} + Header_{ethernet} = 242 \text{ Byte} + 18 \text{ Byte} = 260 \text{ Byte}$$

Dari *Ethernet* digunakan medium kabel *twisted pair* 100BaseT dari *base station* menuju *subscriber station*, *frame Ethernet* dikirimkan ke layer MAC WiMAX dan mengalami penambahan *header* MAC. Maka W_{frame} total dapat dicari, yaitu :

$$W_{frame \text{ total}} = W_{frame} + Header_{MAC} = 260 \text{ Byte} + 6 \text{ Byte} = 256 \text{ Byte}$$

Maka *delay* enkapsulasi pada QPSK-1/2 dengan bit rate 3.17 dapat dicari dengan Persamaan 2.29 berikut :

$$t_{e1} = \frac{W_{frame \text{ total}}}{C_{ethernet}} \times 8 = \frac{256}{10 \times 10^6} \times 8 = 0.2128 \text{ ms}$$

$$t_{e2} = \frac{W_{frame \text{ total}}}{C_{WIMAX}} \times 8 = \frac{256}{82.294 \times 10^6} \times 8 = 0.0270 \text{ ms}$$

Maka *delay* dekapsulasi pada QPSK-1/2 dengan bit rate 3.17 dapat dicari dengan Persamaan 2.30 berikut:

$$t_{d1} = \frac{W_{frame \text{ total}}}{C_{ethernet}} \times 8 = \frac{256}{10 \times 10^6} \times 8 = 0.2128 \text{ ms}$$

$$t_{d2} = \frac{W_{\text{frame total}}}{C_{\text{WIMAX}}} \times 8 = \frac{256}{82.294 \times 10^6} \times 8 = 0.0270 \text{ ms}$$

Maka didapatkan *delay* proses :

$$t_{\text{proses}} = t_{d1} + t_{d2} + t_{e1} + t_{e2}$$

$$t_{\text{proses}} = 0.2128 + 0.0270 + 0.2128 + 0.0270$$

$$t_{\text{proses}} = 0.4796 \text{ ms}$$

Dengan cara yang sama diperoleh nilai *delay* proses dengan *subcarrier* 512 pada kanal 5 MHz untuk berbagai jenis tipe modulasi lain yang ditunjukkan pada Tabel 5.15 berikut.

Tabel 5.15 Hasil *delay* proses dari *subcarrier* 512

Tipe Modulasi	Laju Data pada Kanal 5 MHz (Mbps)	<i>delay</i> Proses (ms)
QPSK 1/2	3.17	0.4796
QPSK 3/4	4.75	0.4793
16 QAM 1/2	6.34	0.4724
16 QAM 3/4	9.5	0.4722
64 QAM 1/2	9.5	0.4669
64 QAM 3/4	14.26	0.4674

❖ *Delay* propagasi

Delay propagasi adalah jumlah waktu yang dibutuhkan oleh gelombang radio untuk berpropagasi pada media transmisi. Dengan menggunakan teknik modulasi QPSK-1/2 dengan jarak terjauh 1287.4 m, maka besar *delay* propagasi pada medium udara dari *subscriber station* menuju *base station* dapat dihitung dengan Persamaan 2.32 :

$$t_{\text{propagasi1}} = \frac{d_{\text{maks}}}{v} = 1287.4 / 3 \times 10^8 = 0.0043 \text{ ms}$$

Waktu propagasi pada medium kabel *twisted pair* 100BaseT dari *base station* menuju *router* adalah :

$$t_{\text{propagasi2}} = \frac{d_{\text{maks1}}}{v_1}$$

$$t_{\text{propagasi2}} = \frac{100}{10 \times 10^6} = 0.01 \text{ ms}$$

Waktu propagasi pada medium kabel *twisted pair* 100BaseT dari *router* menuju jaringan internet adalah :

$$t_{propagasi} = \frac{dmaks2}{v1}$$

$$t_{propagasi} = \frac{100}{10 \times 10^6} = 0.01 \text{ ms} = 0.0486 \text{ m}$$

$$t_{propagasi} = 0.0486 \text{ m}$$

Dengan cara yang sama diperoleh nilai *delay* propagasi dengan *subcarrier* 512 pada kanal 5 MHz untuk berbagai jenis tipe modulasi lain yang ditunjukkan pada Tabel 5.16 berikut.

Tabel 5.16 Hasil *delay* propagasi dari *subcarrier* 512

Tipe Modulasi	Laju Data pada Kanal 5 MHz (Mbps)	delay Propagasi (ms)
QPSK ½	3.17	0.0486
QPSK ¾	4.75	0.0477
16 QAM ½	6.34	0.0459
16 QAM ¾	9.5	0.0453
64 QAM ½	9.5	0.0441
64 QAM ¾	14.26	0.0439

❖ Delay transmisi

Delay transmisi adalah waktu yang dibutuhkan untuk meletakkan semua data pada media transmisi, dipengaruhi oleh ukuran paket dan kapasitas media transmisi. Delay ini hanya terjadi sekali saja di sumber informasi. Besar *delay* transmisi sesuai dengan Persamaan 2.33 :

$$t_{transmisi} = \frac{W_{frame\ total}}{C_{WIMAX}} \times 8$$

$$t_{transmisi} = \frac{256}{75.846 \times 10^6} \times 8 = 0.0281 \text{ ms}$$

$$t_{transmisi\ total} = t_{transmisi} \times 2 = 0.0562 \text{ ms}$$

Dengan cara yang sama diperoleh nilai *delay* transmisi dengan *subcarrier* 512 pada kanal 5 MHz untuk berbagai jenis tipe modulasi lain yang ditunjukkan pada Tabel 5.17 berikut :

Tabel 5.17 Hasil *delay* transmisi dari *subcarrier* 512

Tipe Modulasi	Laju Data pada Kanal 5 MHz (Mbps)	Delay transmisi (ms)
QPSK ½	3.17	0.0540
QPSK ¾	4.75	0.0537
16 QAM ½	6.34	0.0468
16 QAM ¾	9.5	0.0466
64 QAM ½	9.5	0.0413
64 QAM ¾	14.26	0.0418

❖ *Delay* antrian

Delay antrian adalah waktu yang dibutuhkan data selama berada dalam antrian untuk ditransmisikan. *Delay* ini disebabkan oleh waktu proses yang diperlukan oleh *router* di dalam menangani paket di sepanjang jaringan.

Pada analisis aplikasi VoIP melalui *mobile* WiMAX, model antrian yang digunakan adalah M/G/1 dengan disiplin antrian FIFO. Model antrian M/M/1 dapat ditulis dengan Persamaan 2.34 :

$$t_w = \frac{1}{\mu} + \frac{\lambda_w}{\mu^2(1-\rho)}$$

Dengan :

$$t_w = \text{delay antrian (ms)}$$

$$X = \text{waktu rata-rata pelayanan (ms)}$$

$$C = \text{kapasitas kanal (bps)}$$

$$\lambda_w = \text{kecepatan kedatangan (paket/detik)}$$

$$\mu = \text{kecepatan pelayanan (paket/detik)}$$

$$\rho = \text{faktor utilitas sistem nirkabel}$$

Faktor utilitas yang digunakan adalah 0.9 dengan model antrian M/G/1, maka *delay* antrian dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$\mu = \frac{C}{L} = \frac{75.486 \text{ Mbps}}{256} \times 8$$

$$\mu = \frac{75.486 \text{ Mbps}}{256} \times 8$$

$$\mu = 2.7002 \times 10^6 \text{ paket/detik}$$

Kecepatan kedatangan paket pada BS adalah :

$$\lambda_w = \mu x \rho = 2.7002 \times 10^6 \times 0.9$$

$$\lambda_w = 2.1332 \times 10^6$$

Sehingga :

$$t_w = \frac{1}{\mu} + \frac{\lambda_w}{\mu^2(1-\rho)}$$

$$t_w = \frac{1}{2.7002 \times 10^6} + \frac{2.1332 \times 10^6}{2.7002 \times 10^6{}^2(1-0.9)} = 0.0042 \text{ ms}$$

Dengan cara yang sama diperoleh nilai *delay* antrian dengan *subcarrier* 512 pada kanal 5 MHz untuk berbagai jenis tipe modulasi lain yang ditunjukkan pada Tabel 5.18 berikut.

Tabel 5.18 Hasil *delay* antrian dari *subcarrier* 512

Tipe Modulasi	Laju Data pada Kanal 5 MHz (Mbps)	<i>delay</i> antrian (ms)
QPSK ½	3.17	0.0042
QPSK ¾	4.75	0.0041
16 QAM ½	6.34	0.0037
16 QAM ¾	9.5	0.0036
64 QAM ½	9.5	0.0032
64 QAM ¾	14.26	0.0033

Maka *delay* MAN aplikasi VoIP melalui *mobile* WiMAX ditunjukkan pada

Tabel 5.19 di bawah :

Tabel 5.19 Hasil *delay* MAN dari *subcarrier* 512

Tipe Modulasi	Laju Data (Mbps)	<i>Delay</i> proses (ms)	<i>Delay</i> propagasi (ms)	<i>Delay</i> Transmisi (ms)	<i>delay</i> antrian (ms)	<i>Delay</i> MAN (ms)
QPSK ½	3.17	0.4796	0.0486	0.0540	0.0042	0.5864
QPSK ¾	4.75	0.4793	0.0477	0.0537	0.0041	0.5848
16 QAM ½	6.34	0.4724	0.0459	0.0468	0.0037	0.5688
16 QAM ¾	9.5	0.4722	0.0453	0.0466	0.0036	0.5677
64 QAM ½	9.5	0.4669	0.0441	0.0413	0.0032	0.5555
64 QAM ¾	14.26	0.4674	0.0439	0.0418	0.0033	0.5564

Maka besar *delay end to end* aplikasi VoIP melalui *mobile* WiMAX ditunjukkan pada Tabel 5.20 berikut:

Tabel 5.20 Hasil *delay end to end* dari *subcarrier* 512

Type Modulasi	Laju Data (Mbps) pada Kanal 5 MHz	Delay codec (ms)	Delay MAN (ms)	Delay end to end (ms)
QPSK ½	3.17	1.5	0.5864	2.0864
QPSK ¾	4.75	1.5	0.5848	2.0848
16 QAM ½	6.34	1.5	0.5688	2.0688
16 QAM ¾	9.5	1.5	0.5677	2.0677
64 QAM ½	9.5	1.5	0.5555	2.0555
64 QAM ¾	14.26	1.5	0.5564	2.0564

5.2.6.6 Analisis *Throughput*

Dalam analisis *throughput* pada VoIP melalui *mobile WiMAX* adalah *throughput WirelesMAN* dari *base station* ke computer/laptop di sisi penerima. Waktu transmisi paket data pada QPSK-1/2 dengan *bit rate* 3.17 Mbps dapat dihitung dengan Persamaan 2.33 :

$$t_{transmisi} = \frac{W_{frame\ total}}{C_{WIMAX}} \times 8$$

$$t_{transmisi} = \frac{256}{75.846 \times 10^6} \times 8 = 0.0270\ ms$$

Konstanta propagasi dengan menggunakan QPSK ½ dihitung dengan Persamaan 2.22 :

$$\alpha = 1 + \frac{2xt_{prop} + 2t_{trans}}{t_{trans}}$$

$$\alpha = 1 + \frac{2x0.0486 + 2x0.0270}{0.0270} = 6.5997$$

Dengan nilai probabilitas yang telah dicari di persamaan sebelumnya, maka nilai *throughput* dapat diketahui dengan Persamaan 2.21 berikut :

$$\lambda = \frac{(1 - \rho)}{t_{transmisi} (1 + (\alpha - 1)\rho)} = 36999\ paket/detik$$

Dengan cara yang sama diperoleh nilai *delay throughput* dengan *subcarrier* 512 pada kanal 5 MHz untuk berbagai jenis tipe modulasi lain yang ditunjukkan pada Tabel 5.21 berikut :

Tabel 5.21 Hasil *throughput* dari *subcarrier* 512

Type Modulasi	Laju Data (Mbps)	Throughput (paket/detik)	Throughput (Mbps)	Throughput (%)
QPSK $\frac{1}{2}$	3.17	36999	75,7739	99,9054
QPSK $\frac{3}{4}$	4.75	37195	76,1753	99,9016
16 QAM $\frac{1}{2}$	6.34	42667	87,3820	99,8968
16 QAM $\frac{3}{4}$	9.5	42864	87,7854	99,8959
64 QAM $\frac{1}{2}$	9.5	48339	98,9982	99,8907
64 QAM $\frac{3}{4}$	14.26	47720	97,7305	99,8905

5.3 Analisis Simulasi VoIP melalui *Mobile* WiMAX

Analisis performansi yang dilakukan pada bab ini berdasarkan pada hasil simulasi yang dilakukan dengan menggunakan *network simulator* OPNET Modeler v.14.5 pada jaringan *mobile* WiMAX yang diimplementasikan dengan layanan VoIP. Data hasil simulasi menggunakan OPNET Modeler diperoleh dengan menggunakan format *website report*, data hasil simulasi secara otomatis dihitung dan ditampilkan dalam nilai rata-rata pada rentang waktu simulasi yang telah ditentukan.

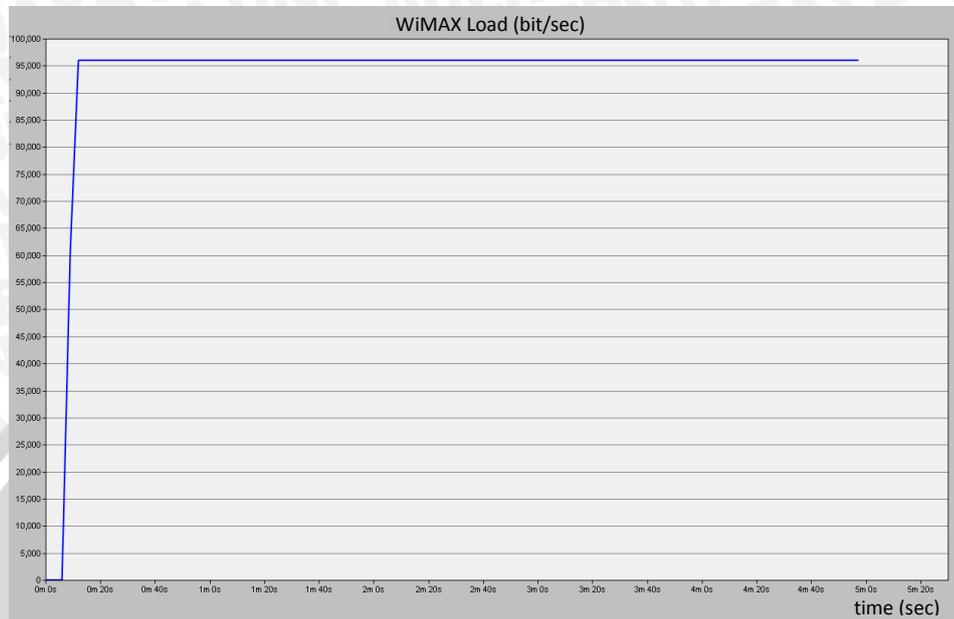
5.3.1 Skenario Perbedaan Tipe Modulasi

Sesuai dengan standar *mobile* WiMAX 802.16e terdapat beberapa tipe modulasi yang digunakan dalam jaringan *mobile* WiMAX, antara lain QPSK, 16-QAM, dan 64-QAM. Pada masing-masing tipe modulasi tersebut, digunakan 2 variasi pengkodean yang berbeda. Semakin tinggi orde modulasi yang digunakan maka laju data akan menjadi lebih tinggi, hal ini disesuaikan dengan standar IEEE 802.16e.

5.3.1.1 Throughput

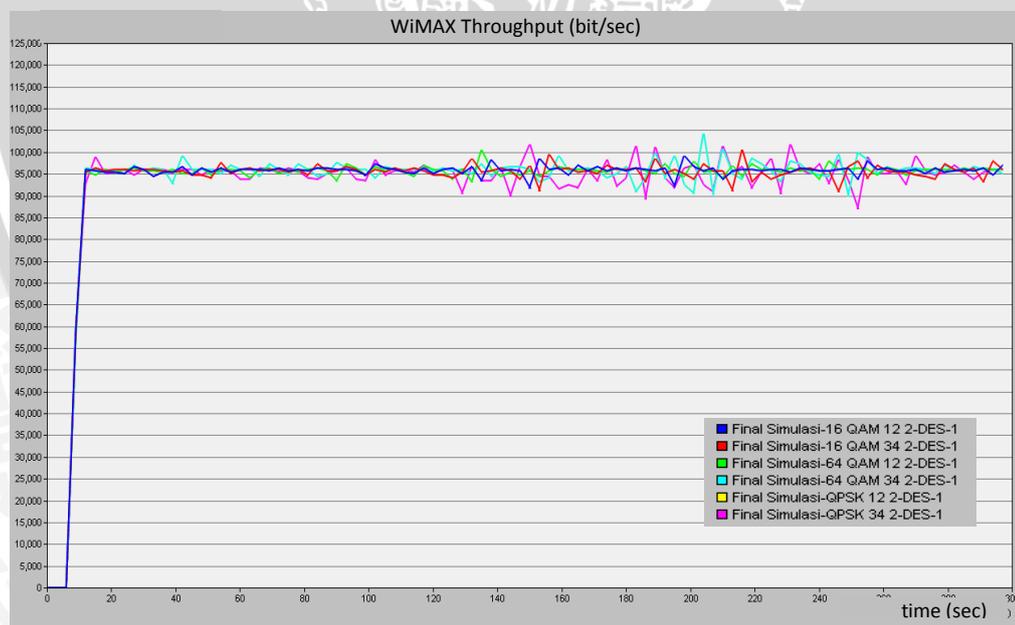
Throughput menunjukkan jumlah data yang diterima dengan benar pada sisi penerima setelah melewati media transmisi. Dalam analisis *throughput* pada VoIP melalui *mobile* WiMAX adalah *throughput* dari *base station* menuju sisi penerima Mobile_2. Dari sisi sumber, Mobile_1 membangkit *load* (beban) sebesar 96.000 bps (sesuai dengan standar G.711). Waktu pembangkitan panggilan VoIP ditentukan 10 detik setelah simulasi dimulai, sehingga setelah dirata-rata dari keseluruhan durasi

simulasi selama 300 detik, beban yang dibangkitkan Mobile_1 adalah sebesar 92.764,27 bps. Gambar 5.1 merupakan grafik beban (bps) yang dibangkitkan oleh Mobile_1 dalam fungsi waktu.



Gambar 5.1 Grafik beban panggilan yang dibangkitkan oleh Mobile_1

Sedangkan Gambar 5.2 menunjukkan grafik *throughput* fungsi waktu yang diterima pada sisi Mobile_2



Gambar 5.2 Grafik *throughput* fungsi waktu yang diterima Mobile_2

Dari *website report* OPNET Modeler, diperoleh nilai rata-rata *throughput* pada Mobile_2 yang ditunjukkan dalam Tabel 5.22 dibawah ini :

Tabel 5.22 *Throughput* pada tipe modulasi yang berbeda hasil simulasi

Tipe Modulasi	Beban Panggilan (bps)	Throughput (bps)
QPSK ½	92.764,27	91.621,87
QPSK ¾	92.764,27	92.377,07
16 QAM ½	92.764,27	92.485,87
16 QAM ¾	92.764,27	92.649,07
64 QAM ½	92.764,27	92.649,07
64 QAM ¾	92.764,27	92.690,67

Prosentase dari *throughput* yang diterima Mobile_2 dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut :

$$\text{throughput} = \frac{\text{jumlah data rata - rata yg diterima dengan benar (bps)}}{\text{load/jumlah data rata - rata yang dikirimkan (bps)}} \times 100\%$$

Maka prosentase *throughput* dari tipe modulasi QPSK ½ dapat ditentukan dengan :

$$\text{throughput} = \frac{92.514,67}{92.7764,27} \times 100\% = 99,7309\%$$

Dengan cara yang sama diperoleh nilai *throughput* dari berbagai jenis tipe modulasi dan pengkodean lain seperti QPSK ¾, 16 QAM ½, 16 QAM ¾, 64 QAM ½, dan 64 QAM ¾. Hasil analisis tersebut ditunjukkan pada Tabel 5.23 berikut :

Tabel 5.23 Prosentase *throughput* pada tipe modulasi yang berbeda

Tipe Modulasi	Throughput (bps)	Throughput (%)
QPSK ½	91.621,87	98,7685
QPSK ¾	92.377,07	99,5826
16 QAM ½	92.485,87	99,6999
16 QAM ¾	92.649,07	99,8758
64 QAM ½	92.649,07	99,8758
64 QAM ¾	92.690,67	99,9207

Penggunaan tipe modulasi yang berbeda dapat dilihat pada Tabel 5.23, dari data pada tabel tersebut dapat dianalisis bahwa semakin tinggi orde modulasi yang digunakan, maka *throughput* yang diterima Mobile_2 menjadi semakin besar. Tampak bahwa pada orde modulasi yang paling rendah yaitu pada QPSK ½, *throughput* yang dihasilkan sebesar 91.621,87 bps, yang merupakan 98,7685% dari jumlah bit data yang dikirim sumber Mobile_1. Begitu pula pada orde modulasi yang

paling tinggi yaitu pada 64 QAM $\frac{3}{4}$, *throughput* yang dihasilkan sebesar 92.690,67 bps, yang merupakan 99,9207% dari jumlah bit data yang dikirimkan oleh sumber Mobile_1.

5.3.1.2 Probabilitas *Packet Loss*

Probabilitas *packet loss total* merupakan probabilitas banyaknya paket yang diterima dalam kondisi salah di sisi penerima. Mengacu pada standar G.711 dengan *frame size* 10 ms, maka Mobile_1 akan mengirimkan paket sebanyak 100 paket per detik (ppd). Dalam simulasi ini didapatkan, jumlah rata-rata paket yang dikirimkan oleh sumber Mobile_1 selama simulasi berlangsung adalah 96,64 paket per detik. Tabel 5.24 di bawah ini menunjukkan *packet loss* yang terjadi selama simulasi berlangsung.

Tabel 5.24 *Packet loss* yang terjadi pada tipe modulasi yang berbeda hasil simulasi

Tipe Modulasi	Rata-rata paket data dikirim (ppd)	Rata-rata paket data diterima (ppd)	<i>Packet Loss</i> (paket)
QPSK $\frac{1}{2}$	96,64	95,45	1,19
QPSK $\frac{3}{4}$	96,64	96,24	0,40
16 QAM $\frac{1}{2}$	96,64	96,35	0,29
16 QAM $\frac{3}{4}$	96,64	96,52	0,12
64 QAM $\frac{1}{2}$	96,64	96,52	0,12
64 QAM $\frac{3}{4}$	96,64	96,56	0,08

Dari data pada Tabel 5.24 di atas, dapat ditentukan probabilitas *packet loss* dengan menggunakan persamaan :

$$\text{probabilitas Packet Loss} = \frac{\text{paket yang dikirim load} - \text{paket yang diterima}}{\text{paket yang dikirim load}}$$

sehingga diperoleh probabilitas *packet loss* pada tipe modulasi QPSK $\frac{1}{2}$ sebagai berikut :

$$\text{probabilitas packet loss} = \frac{96,64 - 95,45}{96,64} = 0,01231$$

dengan cara yang sama diperoleh nilai probabilitas *packet loss* untuk berbagai jenis tipe modulasi yang lain, ditunjukkan dalam Tabel 5.25 di bawah ini :

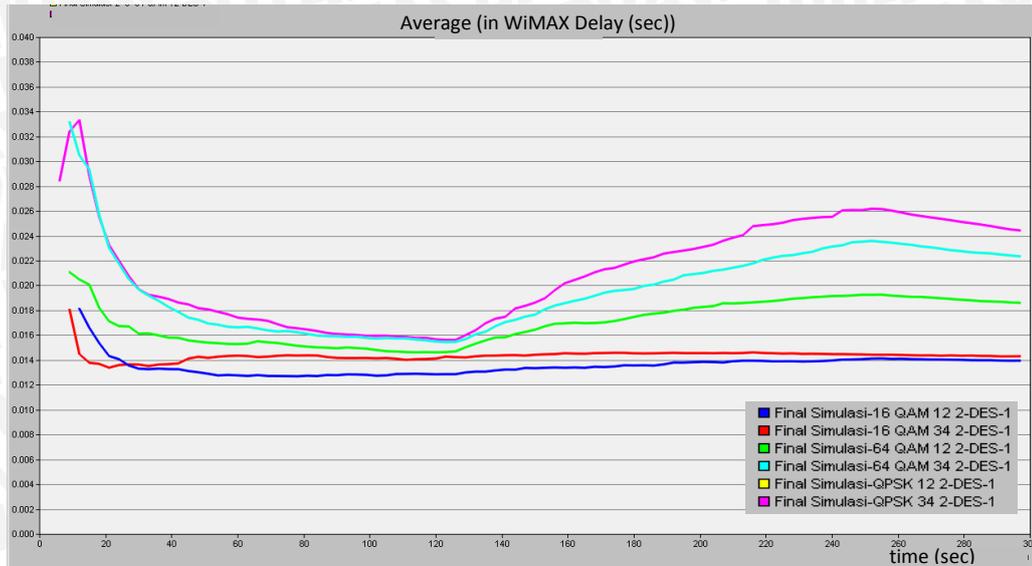
Tabel 5.25 Probabilitas *packet loss* pada tipe modulasi yang berbeda

Tipe Modulasi	Rata-rata paket Data diterima (pps)	Probabilitas <i>Packet Loss</i>
QPSK $\frac{1}{2}$	95,45	0,0123
QPSK $\frac{3}{4}$	96,24	0,0041
16 QAM $\frac{1}{2}$	96,35	0,0030
16 QAM $\frac{3}{4}$	96,52	0,0012
64 QAM $\frac{1}{2}$	96,52	0,0012
64 QAM $\frac{3}{4}$	96,56	0,0008

Berdasarkan data pada Tabel 5.25 terlihat pengaruh perbedaan tipe modulasi terhadap probabilitas *packet loss* pada aplikasi VoIP melalui *mobile* WiMAX, dapat dianalisis bahwa semakin tinggi orde modulasi yang digunakan maka probabilitas *packet loss* yang terjadi akan semakin kecil. Pada orde modulasi yang paling rendah yaitu pada QPSK $\frac{1}{2}$, rata-rata jumlah paket data yang diterima adalah 95,45 paket dengan probabilitas *packet loss* sebesar 0,01231. Sedangkan pada orde modulasi yang paling tinggi yaitu pada 64 QAM $\frac{3}{4}$, rata-rata jumlah paket data yang diterima adalah 96,56 paket, dengan probabilitas *packet loss* sebesar 0,00083.

5.3.1.3 Delay End to End

Delay end to end merupakan penjumlahan *delay-delay* yang ada dalam perjalanan paket data dari sumber ke tujuan. Pada simulasi ini, Mobile_1 berfungsi sebagai sumber panggilan dan Mobile_2 berfungsi sebagai tujuan panggilan, maka *delay* dihitung dari Mobile_1 ke Mobile_2. Gambar 5.3 di bawah ini menunjukkan grafik rata-rata *delay end to end* fungsi waktu hasil simulasi dengan menggunakan tipe modulasi berbeda.



Gambar 5.3 Grafik rata-rata *delay end to end* fungsi waktu hasil simulasi dengan menggunakan tipe modulasi berbeda

Dalam simulasi ditentukan waktu pembangkitan panggilan VoIP adalah 10 detik setelah simulasi dimulai, sehingga *delay* yang ditunjukkan pada Gambar 5.3 dimulai dari detik ke 10 hingga simulasi selesai.

Waktu pembangkitan panggilan VoIP ditentukan 10 detik setelah simulasi dimulai, sehingga *delay* yang ditunjukkan pada Gambar 5.3 dimulai dari detik ke 10 hingga simulasi selesai. Dari *website report* OPNET Modeler, diperoleh nilai rata-rata *delay end to end* dari Mobile_1 ke Mobile_2 yang tercantum dalam Tabel 5.26 berikut :

Tabel 5.26 Rata-rata *delay end to end* pada tipe modulasi berbeda hasil simulasi

Tipe Modulasi	Rata-rata <i>delay end to end</i> (ms)
QPSK ½	12,872
QPSK ¾	13,569
16 QAM ½	18,341
16 QAM ¾	21,532
64 QAM ½	21,613
64 QAM ¾	23,842

Penggunaan tipe modulasi yang berbeda dapat dilihat pada Tabel 5.26, dari tabel tersebut dapat dianalisis bahwa semakin tinggi orde modulasi yang digunakan, maka *delay end to end* yang terjadi pada aplikasi VoIP melalui *mobile* WiMAX

menjadi semakin besar. Pada orde modulasi yang paling rendah yaitu pada QPSK $\frac{1}{2}$, *delay end to end* yang dibutuhkan selama 12,872 ms, sedangkan pada orde modulasi yang paling tinggi yaitu pada 64 QAM $\frac{3}{4}$, *delay end to end* yang dibutuhkan selama 23,842 ms.

Tabel 5.6 menunjukkan bahwa pada skenario penggunaan tipe modulasi yang berbeda diperoleh nilai *throughput*, probabilitas *packet loss*, dan *delay end to end* yang bervariasi. Namun dari nilai-nilai tersebut masih dalam batas yang dapat ditoleransi dalam aplikasi VoIP melalui *mobile WiMAX*.

Tabel 5.27 Analisis rata-rata *throughput*, probabilitas *packet loss*, dan *delay end to end* hasil simulasi

Tipe Modulasi	Throughput (%) (> 90%)	Probabilitas Packet Loss	Rata-rata delay end to end (ms) (<150 ms)
QPSK $\frac{1}{2}$	98,7685	0,0123	12,872
QPSK $\frac{3}{4}$	99,5826	0,0041	13,569
16 QAM $\frac{1}{2}$	99,6999	0,0030	18,341
16 QAM $\frac{3}{4}$	99,8758	0,0012	21,532
64 QAM $\frac{1}{2}$	99,8758	0,0012	21,613
64 QAM $\frac{3}{4}$	99,9207	0,0008	23,842

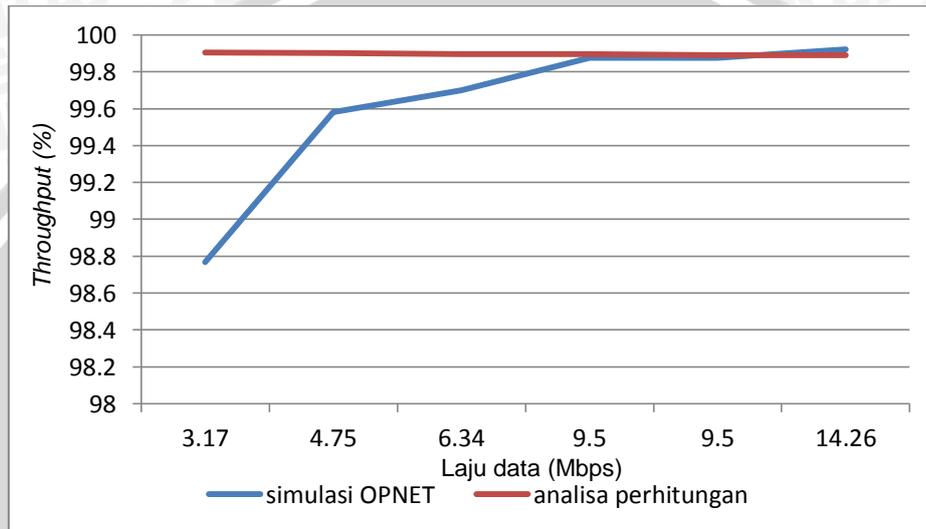
Berdasarkan penjelasan pada bab sebelumnya, semakin banyak bit data yang ditransmisikan mengakibatkan kemungkinan bit salah yang terjadi akan semakin besar, hal ini dapat dilihat pada hasil perhitungan pada Tabel 5.14. Pada Tabel 5.14 menunjukkan bahwa pada tipe modulasi 64 QAM $\frac{3}{4}$ menghasilkan kemungkinan bit salah paling tinggi, yaitu sebesar 2.58008×10^{-10} . Tingginya kemungkinan bit salah yang terjadi akan mengakibatkan semakin menurunnya *throughput* sebagaimana terlihat pada Tabel 5.21. Pada tabel tersebut tipe modulasi 64 QAM $\frac{3}{4}$ menghasilkan prosentase *throughput* terkecil yaitu sebesar 99.8905 %.

Untuk memperbaiki kondisi tersebut WiMAX menggunakan metode *error-control* untuk transmisi data yang menggunakan *acknowledgement* dan waktu *timeout* yang disebut ARQ. Metode ARQ dapat meningkatkan prosentase *throughput*, namun akan berdampak pada meningkatnya *delay*.

Hal ini ditunjukkan pada Tabel 5.27 di atas, pada tipe modulasi 64 QAM $\frac{3}{4}$ tampak bahwa probabilitas *packet loss* yang terjadi memiliki nilai paling kecil

dibandingkan dengan tipe modulasi lain yakni sebesar 0,0008, diiringi dengan tingginya prosentase *throughput* sebesar 99,9207%. Akibat dari metode tersebut adalah meningkatnya *delay* yang terjadi dalam pengiriman paket, karena diperlukan waktu tambahan untuk mengirimkan ulang paket yang salah sehingga *delay* yang terjadi pada tipe modulasi 64 QAM $\frac{3}{4}$ adalah yang tertinggi, yaitu sebesar 23,842 ms.

Pada Gambar 5.4 menunjukkan perbedaan prosentase *throughput* antara hasil analisis perhitungan dengan simulasi menggunakan OPNET Modeler.



Gambar 5.4 Grafik hubungan antara laju data dengan prosentase *throughput*

Perbedaan yang timbul antara hasil analisis perhitungan dengan hasil simulasi terjadi dikarenakan pada proses simulasi digunakan rentang waktu simulasi tertentu, sehingga metode *error-control* yang terdapat pada WiMAX dapat terlihat, dimana metode tersebut tidak dapat terlihat jika analisis menggunakan perhitungan.

5.3.2 Skenario Penambahan Jumlah User

Skenario ini, menunjukkan pengaruh penambahan jumlah *user* terhadap performansi VoIP pada jaringan *mobile* WiMAX yang meliputi parameter *throughput*, probabilitas *packet loss*, dan *delay end to end*. Dalam skenario ini modulasi yang digunakan adalah 64 QAM $\frac{3}{4}$. Mobilitas masing-masing *user* ditetapkan secara acak, dengan kecepatan rata-rata 0,5 m/s. Jumlah *user* yang disimulasikan dimulai dari 2, 4, 8, 12, 16 hingga 20 *user*.

Berdasarkan hasil simulasi yang ditunjukkan melalui *website report* OPNET Modeler, diperoleh keseluruhan nilai rata-rata parameter performansi VoIP, yaitu

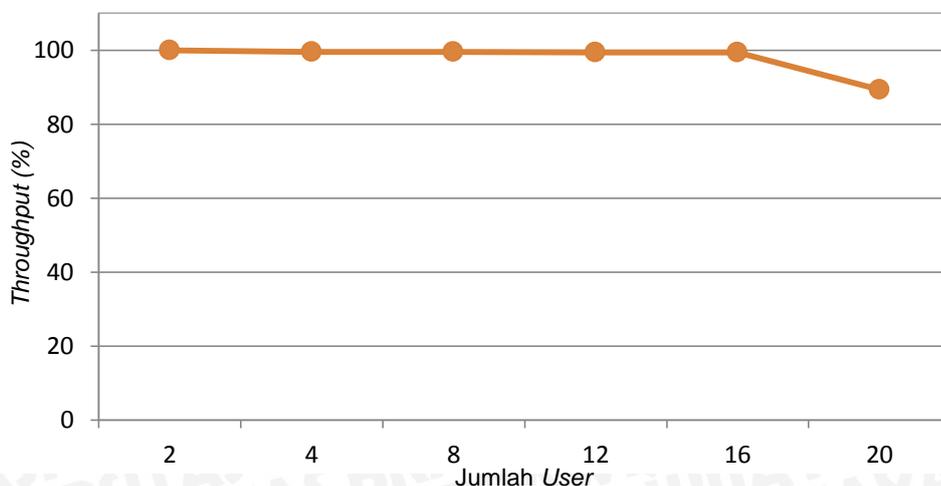
throughput, probabilitas *packet loss*, dan *delay end to end* yang tercantum dalam Tabel 5.28 dibawah ini:

Tabel 5.28 Performansi pada skenario penambahan jumlah *user*

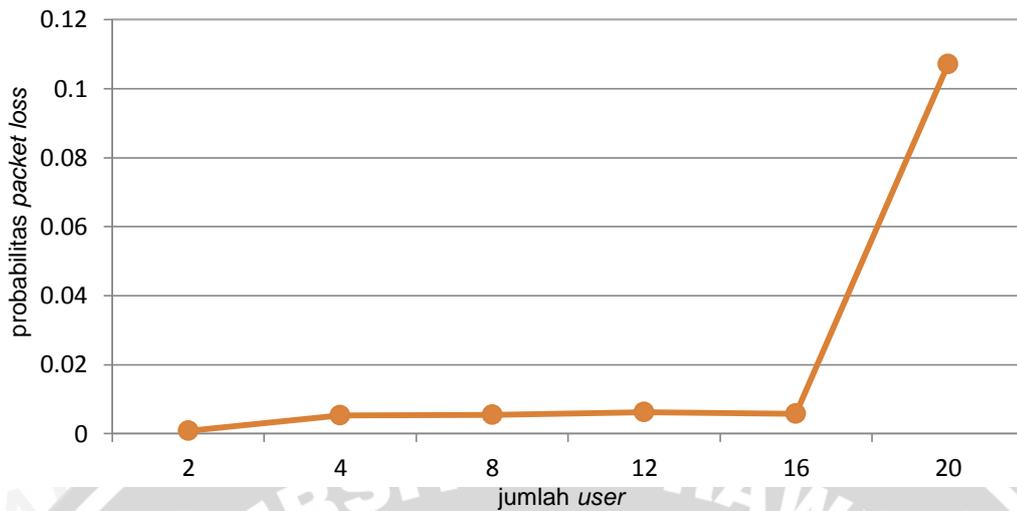
Skenario	Jumlah <i>user</i>	<i>Throughput</i> (%)	Probabilitas <i>Packet Loss</i>	<i>Delay End to End</i> (detik)
1	2	99,9207	0,0008	0,0238
2	4	99,4702	0,0053	0,0296
3	8	99,4487	0,0055	0,0366
4	12	99,3829	0,0062	0,0391
5	16	99,2867	0,0072	0,0403
6	20	89,2987	0,1070	0,0811

Berdasarkan data pada Tabel 5.28 di atas, pada saat terdapat 2 *user* yang melakukan panggilan, maka prosentase *throughput* yang terjadi adalah sebesar 99,9207% dengan probabilitas *packet loss* 0,0008 dan seiring dengan jumlah *user* yang semakin bertambah hingga terdapat 20 *user* yang melakukan panggilan secara serentak, diperoleh prosentase *throughput* sebesar 89,2987% dengan probabilitas *packet loss* 0,1070. Sehingga dapat disimpulkan bahwa semakin banyak jumlah *user* yang melakukan panggilan dalam satu sel maka prosentase *throughput* mengalami penurunan secara linier, dan hal ini diiringi dengan meningkatnya probabilitas *packet loss* yang terjadi.

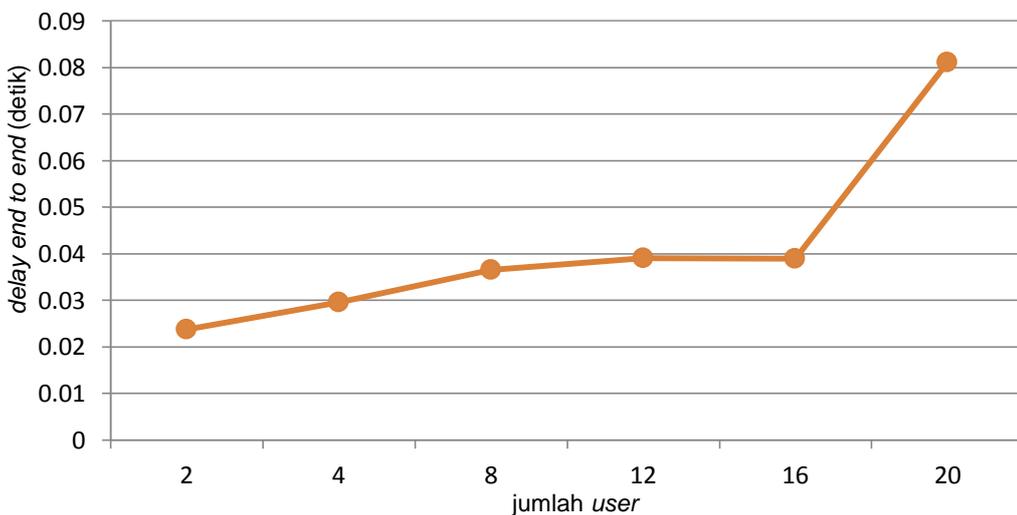
Gambar 5.5 dan Gambar 5.6 di bawah ini, menunjukkan grafik pengaruh penambahan jumlah *user* terhadap performansi VoIP melalui *mobile WiMAX* pada parameter *throughput* dan probabilitas *packet loss*.



Gambar 5.5 Grafik pengaruh penambahan jumlah *user* terhadap parameter *throughput*



Gambar 5.6 Grafik pengaruh penambahan jumlah *user* terhadap parameter probabilitas *pakete loss*



Gambar 5.7 Grafik pengaruh penambahan jumlah *user* terhadap parameter *delay end to end*

Gambar 5.7 di atas menunjukkan grafik *delay end to end* yang terjadi selama simulasi berlangsung. Penambahan jumlah *user* ini juga berpengaruh terhadap meningkatnya *delay end to end* yang terjadi selama panggilan berlangsung. Pada saat terdapat 2 *user* yang melakukan panggilan *delay end to end* yang terjadi adalah sebesar 0,0238 detik dan terus bertambah seiring dengan penambahan jumlah *user* hingga diperoleh *delay end to end* sebesar 0,0811 detik ketika jumlah *user* mencapai 20 *user*.