

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Umum

Dalam bab ini akan dilakukan pembahasan dan analisis kinerja modulasi adaptif terhadap performansi *video conference* pada jaringan *Long term Evolution* (LTE). Analisis yang dilakukan meliputi parameter *delay end to end*, probabilitas *packet loss*, dan *throughput*.

Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah analisis secara matematis, yaitu dilakukan dengan mengumpulkan nilai-nilai parameter yang berupa data sekunder serta melakukan perhitungan menggunakan persamaan-persamaan yang telah dijelaskan dalam Bab II. Beberapa data yang akan digunakan pada penelitian ini antara lain yaitu :

1. Jaringan *Long Term Evolution* (LTE)
 - a. Frekuensi kerja sebesar 2300 MHz.
 - b. *Bandwidth* kanal sebesar 10 Mhz.
 - c. Kondisi kanal yang digunakan adalah *Non-Line Of Sight* (NLOS).
2. *Video Conference*
 - a. *Frame rate* yang digunakan sebesar 30 fps karena menggunakan format gambar CIF.
 - b. Spesifikasi CODEC yang digunakan ditunjukkan pada tabel 4.1

Tabel 4.1 Spesifikasi CODEC

<i>Audio CODEC</i>	<i>Bit Rate</i> (Kbps)	<i>Maximum Payload</i> (byte)	<i>Delay CODEC</i> (ms)
G.711	64	160	0,75
<i>Video CODEC</i>	<i>Bit Rate</i> (Kbps)	<i>Maximum Payload</i> (byte)	<i>Delay CODEC</i> (ms)
H.264	64-384	254	150

Sumber: Cisco System, 2006

4.2 Analisis Link Budget

Pada sub bab ini akan dibahas kinerja modulasi adaptif pada jaringan LTE dengan melakukan perhitungan beberapa nilai parameter yang meliputi redaman propagasi/*path loss*, RSL (*Receive Signal Level*), dan Rss (*Receiver sensitivity*) untuk

mengetahui seberapa jauh sinyal dari eNodeB masih dapat diterima oleh *user equipment* dan skema modulasi apa yang digunakan.

4.2.1 Analisis Path Loss

Path loss digunakan untuk mengetahui besarnya *loss* (rugi-rugi) yang terjadi selama proses pengiriman data dari pemancar ke penerima di dalam media transmisi. Untuk mempermudah proses analisis dan perhitungan, maka digunakan beberapa data sekunder seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 4.2 mengenai parameter perhitungan *link budget* untuk LTE.

Tabel 4.2 Parameter *Link Budget* LTE

No	Parameter <i>Link Budget</i>	Nilai
<i>Transmitter (Evolved Node B)</i>		
1	Tx Height (h_t)	30 m
2	Total Tx Power (P_{tx})	48 dBm
3	Tx Antenna Gain (G_{tx})	21 dBi
4	Cable Loss (L_{tx})	2 dB
<i>Receiver (User Equipment)</i>		
1	Rx Height (h_r)	1,5 m
2	UE Noise Figure (NF)	7 dB
3	Body Loss (L_{rx})	0 dB
4	Rx Antenna Gain (G_{rx})	10 dBi

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

Perhitungan rugi-rugi propagasi akan dilakukan dengan persamaan (2-6). Nilai rugi-rugi propagasi akan dicari dengan mengubah jarak antara eNodeB dan UE dari 500 m hingga 3 km sesuai dengan persamaan:

$$L_{propagasi}[dB] = A_{fs} + A_{bm} - G_t - G_r$$

dimana

$$A_{fs} = 92,4 + 20\log(d) + 20\log(f)$$

$$A_{fs} = 92,4 + 20\log(d) + 20\log(2,3)$$

$$A_{fs} = 99,6346 + 20\log(d)$$

$$A_{bm} = 20,41 + 9,38\log(d) + 7,894\log(f) + 9,56[\log(f)]^2$$

$$A_{bm} = 20,41 + 9,38\log(d) + 7,894\log(2,3) + 9,56[\log(2,3)]^2$$

$$A_{bm} = 24.5164 + 9,38\log(d)$$

$$G_t = \log(h_t/200)\{13,958 + 5,8[\log(d)]^2\}$$

$$G_t = \log(30/200)\{13,958 + 5,8[\log(d)]^2\}$$

$$G_t = -11.5001 - 4,78[\log(d)]^2$$

$$G_r = [42,57 + 13,7\log(f)][\log(h_r) - 0,585]$$

$$G_r = [42,57 + 13,7\log(2,3)][\log(1,5) - 0,585]$$

$$G_r = -19.4337$$

maka *loss* propagasi

$$L_{propagasi} [dB]$$

$$= 99,6346 + 20 \log(d) + 24,5164 + 9,38 \log(d) + 11,5001 + 4,78[\log(d)]^2 + 19,4337$$

untuk $d = 500$ m

$$L_{propagasi} [dB] = 146.5380 \text{ dB}$$

untuk $d = 1$ km

$$L_{propagasi} [dB] = 155.0847 \text{ dB}$$

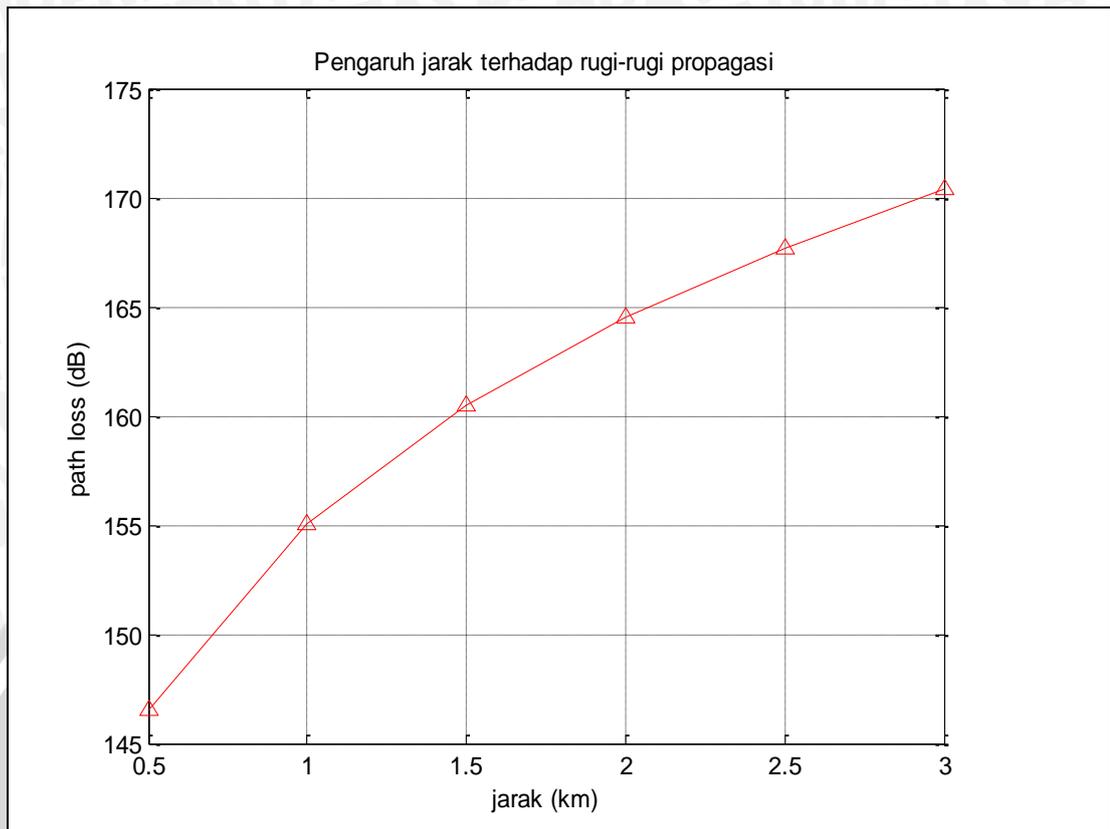
Dengan perhitungan yang sama untuk jarak yang lainnya akan didapat hasil perhitungan rugi – rugi propagasi *ECC-33 Path Loss* seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Hasil Perhitungan Rugi – Rugi Propagasi *ECC-33 Path Loss Model*

Jarak eNodeB dan UE (d) (m)	Loss Propagasi (dB)
500	146,5380
1000	155,0847
1500	160,4857
2000	164,4975
2500	167,7120
3000	170,4051

(Sumber: Hasil Perhitungan)





Gambar 4.1 Grafik hubungan antara jarak eNodeB-UE dengan rugi-rugi propagasi

Sumber: Hasil Perhitungan

Dari gambar dapat dilihat semakin jauh jarak antara eNodeB dengan UE maka rugi-rugi propagasi juga semakin besar.

4.2.2 Analisis RSL (*Receive Signal Level*)

Dalam perhitungan RSL (*Receive Signal Level*) diperlukan nilai EIRP (*Effective Isotropic Radiated Power*). EIRP merupakan besaran yang menyatakan kekuatan daya pancar suatu antena di bumi. Perhitungan EIRP dilakukan dengan menggunakan persamaan (2-11).

$$EIRP = P_{tx} + G_{tx} - L_{tx}$$

$$EIRP = 48 + 21 - 2$$

$$EIRP = 67 \text{ dBm}$$

RSL (*Receive Signal Level*) adalah level sinyal yang diterima di penerima dan nilainya harus lebih besar dari sensitivitas perangkat penerima ($RSL \geq R_{ss}$). Perhitungan RSL dilakukan dengan menggunakan persamaan (2-12)

$$RSL = EIRP - L_{propagasi} + G_{rx} - L_{rx}$$

Nilai RSL akan berubah seiring dengan jarak SS yang semakin jauh dari BS. Dengan memasukkan nilai rugi-rugi propagasi dari Tabel 4.3 maka akan didapatkan nilai RSL untuk jarak BS dan SS dari 500 m hingga 3 km.

Untuk $d = 500$ m

$$RSL = 67 - 146,5380 + 10 - 0$$

$$RSL = -69,5380$$

Untuk $d = 1$ km

$$RSL = 67 - 155,0847 + 10 - 0$$

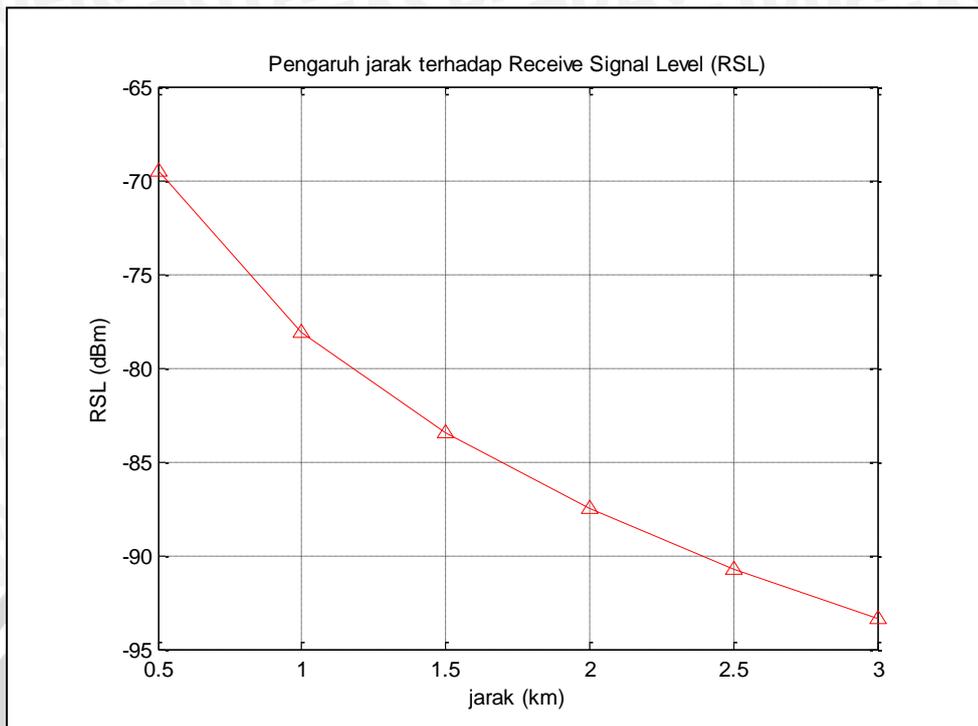
$$RSL = -78,0847$$

Dengan perhitungan yang sama untuk jarak yang lain akan didapat hasil *receive signal level* dengan model propagasi *ECC-33 Path Loss Model* seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Hasil Perhitungan *Receive Signal Level*

Jarak eNodeB dan UE (d) (m)	RSL (dBm)
500	-69,5380
1000	-78,0847
1500	-83,4857
2000	-87,4975
2500	-90,7120
3000	-93,4051

(Sumber: Hasil Perhitungan)



Gambar 4.2 Grafik hubungan antara jarak eNodeB-UE dengan *Receive Signal Level* (RSL)

Sumber: Hasil Perhitungan

Dari gambar dapat dilihat semakin jauh jarak antara eNodeB dengan UE maka nilai RSL semakin kecil.

4.2.3 Analisis Rss (*Receiver Sensitivity*)

Sensitivitas perangkat penerima merupakan kepekaan suatu perangkat pada sisi penerima yang dijadikan ukuran *threshold*. Perhitungan Rss dilakukan dengan menggunakan persamaan (2-13)

$$Rss[dBm] = 10 \log(kTB) + SNR_{RX} + N_F$$

dimana nilai SNR yang dipakai diambil dari standar LTE yang ditunjukkan oleh tabel 4.5

Tabel 4.5 Standar LTE untuk SNR *threshold*

Modulasi	Coding Rate	Receiver SNR threshold (dB)
QPSK	1/2	2
QPSK	3/4	5,5
16-QAM	1/2	7,9
16-QAM	3/4	12,2
64-QAM	2/3	15,3
64-QAM	3/4	17,5

(Sumber: Rohde & Schwarz, 2013)



Sensitivitas UE akan dihitung untuk semua skema modulasi dan pengkodean adaptif.

- Untuk modulasi QPSK dengan *coding rate* 1/2
 $R_{ss}[dBm] = 10 \log(1000 \times 1,38 \times 10^{-23} \times 290 \times 10 \times 10^6) + 2 + 7$
 $R_{ss}[dBm] = -94,9772 \text{ dBm}$
- Untuk modulasi QPSK dengan *coding rate* 3/4
 $R_{ss}[dBm] = 10 \log(1000 \times 1,38 \times 10^{-23} \times 290 \times 10 \times 10^6) + 5,5 + 7$
 $R_{ss}[dBm] = -92,6772 \text{ dBm}$
- Untuk modulasi 16-QAM dengan *coding rate* 1/2
 $R_{ss}[dBm] = 10 \log(1000 \times 1,38 \times 10^{-23} \times 290 \times 10 \times 10^6) + 7,9 + 7$
 $R_{ss}[dBm] = -89,0772 \text{ dBm}$
- Untuk modulasi 16-QAM dengan *coding rate* 3/4
 $R_{ss}[dBm] = 10 \log(1000 \times 1,38 \times 10^{-23} \times 290 \times 10 \times 10^6) + 12,2 + 7$
 $R_{ss}[dBm] = -85,6772 \text{ dBm}$
- Untuk modulasi 64-QAM dengan *coding rate* 2/3
 $R_{ss}[dBm] = 10 \log(1000 \times 1,38 \times 10^{-23} \times 290 \times 10 \times 10^6) + 15,3 + 7$
 $R_{ss}[dBm] = -81,6772 \text{ dBm}$
- Untuk modulasi 64-QAM dengan *coding rate* 3/4
 $R_{ss}[dBm] = 10 \log(1000 \times 1,38 \times 10^{-23} \times 290 \times 10 \times 10^6) + 17,5 + 7$
 $R_{ss}[dBm] = -79,4772 \text{ dBm}$

Hasil perhitungan *receiver sensitivity* (Rss) perangkat untuk sistem modulasi dan pengkodean adaptif ditunjukkan pada tabel 4.6

Tabel 4.6 Hasil Perhitungan *Receiver Sensitivity*

Modulasi	<i>Coding Rate</i>	<i>Receiver Sensitivity</i>
QPSK	1/2	-94,9772
QPSK	3/4	-92,6772
16-QAM	1/2	-89,0772
16-QAM	3/4	-85,6772
64-QAM	2/3	-81,6772
64-QAM	3/4	-79,4772

(Sumber: Hasil Perhitungan)

4.2.4 Analisis Batas *Switching Point*

RSL (*Receive Signal Level*) adalah level sinyal yang diterima di penerima dan nilainya harus lebih besar dari sensitivitas perangkat penerima ($RSL \geq R_{ss}$). Dari Tabel

4.6 dapat dilihat bahwa UE hanya dapat melakukan skema modulasi dan pengkodean tinggi (64-QAM $\frac{3}{4}$) jika sensitivitas minimum yang diterima sebesar -79,4772 dBm. Dari Gambar 4.2 terlihat bahwa untuk model ECC-33, UE yang bisa menikmati modulasi dan pengkodean tinggi ini hanyalah yang berada pada jarak sejauh 0 km – 1 km lebih dari eNodeB. Untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat maka dilakukan perhitungan batas *switching point* untuk menentukan batas jarak dimana UE dapat menggunakan skema modulasi dan pengkodean tertentu. Hal ini dilakukan dengan mensubstitusikan nilai pada Tabel 4.6 sebagai nilai RSL.

$$RSL = EIRP - L_{propagasi} + Grx - Lrx$$

$$RSL = 77 - L_{propagasi}$$

Untuk Model Propagasi ECC-33 Path Loss

$$L_{propagasi}[dB] = 99,6346 + 20 \log(d) + 24,5164 + 9,38 \log(d) + 11,5001 + 4,78[\log(d)]^2 + 19,4337$$

$$L_{propagasi}[dB] = 155,0848 + 29,38 \log(d) + 4,78(\log d)^2$$

Sensitivitas QPSK $\frac{1}{2}$ adalah -94,9772 dBm, maka :

$$-94,9772 = 77 - L_{propagasi}$$

$$L_{propagasi} = 171,9772 \text{ dB}$$

$$155,0848 + 29,38 \log(d) + 4,78(\log d)^2 = 171,9772$$

$$29,38 \log(d) + 4,78(\log d)^2 = 16,8924$$

$$\text{misal } x = \log d$$

$$29,38 x + 4,78 x^2 = 16,8924$$

$$4,78 x^2 + 29,38 x - 16,8924 = 0$$

$$x_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

$$x_{1,2} = \frac{-29,38 \pm \sqrt{863,1844 + 499,6343}}{9,56}$$

$$x_1 = 0,5294$$

$$x_2 = -6,6758$$

Substitusikan log d ke x, maka $\log d = 0,7883$

$$d = 3,3835 \text{ km}$$

Dengan perhitungan yang sama untuk skema modulasi dan pengkodean yang lain, maka didapat batas *switching point* seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.7

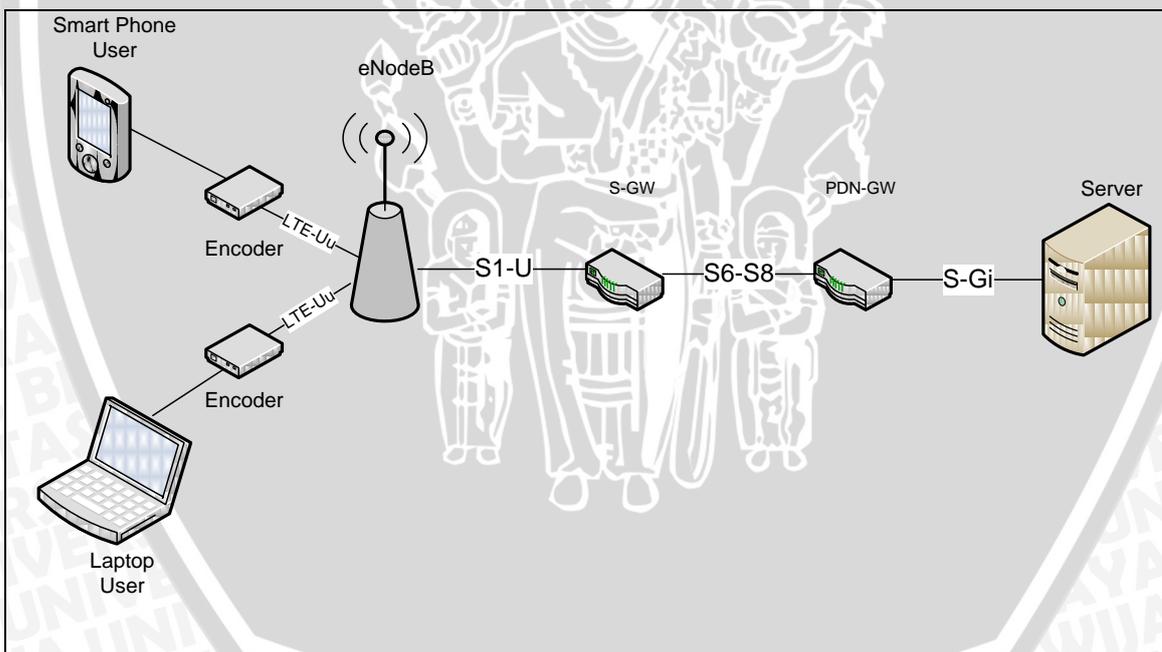
Tabel 4.7 Batas *Switching Point* modulasi adaptif

Jarak eNodeB dan UE (d)	Skema Modulasi dan Pengkodean
> 0 km - 1,1144 km	64-QAM $\frac{3}{4}$
> 1,1144 km - 1,3181 km	64-QAM $\frac{2}{3}$
> 1,3181 km - 1,7717 km	16-QAM $\frac{3}{4}$
> 1,7717 km - 2,2583 km	16-QAM $\frac{1}{2}$
> 2,2583 km - 2,8971 km	QPSK $\frac{3}{4}$
> 2,8971 km - 3,3835 km	QPSK $\frac{1}{2}$
> 3,3835 km	No Signal

(Sumber: Hasil Perhitungan)

4.3 Analisis Performansi *Video Conference* Pada Jaringan LTE

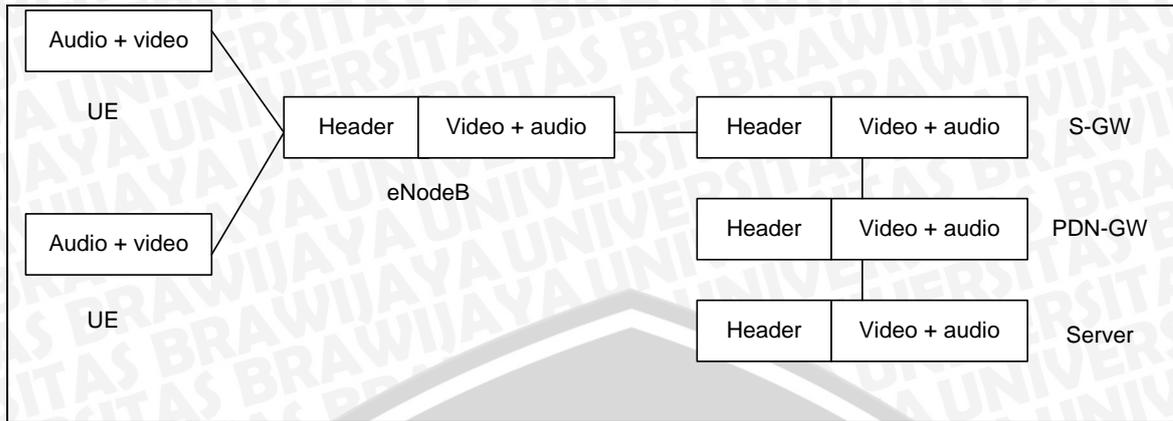
Pada sub bab ini akan dibahas kinerja modulasi adaptif terhadap performansi *video conference* pada jaringan LTE dengan melakukan perhitungan beberapa nilai parameter yang meliputi *delay end to end*, probabilitas *packet loss*, dan *throughput*. Konfigurasi aplikasi *video conference* pada LTE ditunjukkan pada gambar 4.3



Gambar 4.3 Konfigurasi *video conference* pada jaringan LTE

(Sumber : Hasil Analisis)

Penggunaan jaringan LTE untuk aplikasi *video conference* diharapkan mampu meningkatkan kualitas pelayanan, karena memiliki *bandwidth* yang besar. Format paket data *video conference* pada saat pentransmisian dari *server* hingga *user* disesuaikan dengan perangkat yang digunakan seperti ditunjukkan pada gambar 4.4



Gambar 4.4 Format paket data *video conference* pada jaringan LTE

(Sumber : Hasil Analisis)

4.3.1 Analisis Delay End to End Video Conference pada Jaringan LTE

Delay end to end video conference merupakan jumlah *delay* CODEC aplikasi *video conference* dengan *delay* jaringan. Model hubungan yang digunakan dalam analisis *delay end-to-end video conference* pada jaringan LTE adalah model hubungan antara server yang terhubung ke jaringan internet hingga ke UE (*User Equipment*).

4.3.1.1 Payload video conference

Pada aplikasi *video conference payload* yang ditransmisikan dibedakan atas *payload audio* dan *video*. CODEC yang digunakan yaitu *audio* CODEC G.711 dengan *bit rate* 64 Kbps dan *video* CODEC H.264 dengan *bit rate* 384 Kbps serta waktu pencuplikan *frame* 33 ms, besarnya *payload* masing-masing dapat dihitung dengan persamaan (2-2)

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

$$\begin{aligned} \text{Untuk } \textit{audio} : P_{LA} &= 64 \cdot 10^3 \text{ bps} \times 33 \cdot 10^{-3} \text{ s} \\ &= 2112 \text{ bit} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Untuk } \textit{video} : P_{LV} &= 384 \cdot 10^3 \text{ bps} \times 33 \cdot 10^{-3} \text{ s} \\ &= 12672 \text{ bit} \end{aligned}$$

Jumlah paket *audio* dan *video* yang akan dikirim dipengaruhi oleh besar *payload* maksimum dari *video* maupun *audio*, sehingga paket *audio* dan *video* dapat dihitung dengan persamaan (2-3):

$$P_{A/V} = \frac{P_{LA/V}}{P_{LA/V \text{ max}}}$$

$$\begin{aligned} \text{Untuk } \textit{audio} : P_A &= \frac{2112}{160} \\ &= 13,2 \text{ paket} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Untuk video: } P_V &= \frac{12672}{254} \\ &= 49,8898 \text{ paket} \end{aligned}$$

Besarnya paket data *video conference* merupakan penjumlahan *payload* paket audio dan *video* dengan *header* NALU, RTP, UDP, dan IPv6, sehingga dapat dihitung dengan persamaan (2-4):

$$\text{Paket data} = P_{LA/V} + (P_{A/V} \times (NALU + H_{RTP} + H_{UDP} + H_{IP}))$$

$$\begin{aligned} \text{Untuk audio : Paket data} &= 2112 + (14 \times (8 + 96 + 64 + 320)) \\ &= 8944 \text{ bit} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Untuk video : Paket data} &= 12672 + (50 \times (8 + 96 + 64 + 320)) \\ &= 37072 \text{ bit} \end{aligned}$$

Panjang paket data *video conference* yang siap ditransmisikan dihitung dengan persamaan (2-5):

$$\begin{aligned} W_{VC\text{-size}} &= P_{\text{audio}} + P_{\text{video}} \\ &= 8944 + 37072 \\ &= 46016 \text{ bit} \\ &= \frac{46016 \text{ bit}}{8} = 5752 \text{ byte} \end{aligned}$$

Paket data dari aplikasi *video conference* ditunjukkan pada gambar 4.5

Paket data audio (8944 bit)	Paket data video (37072 bit)	NALU (8 bit)	H _{RTP} (96 bit)	H _{UDP} (64 bit)	H _{IP} (320 bit)
--------------------------------	---------------------------------	-----------------	------------------------------	------------------------------	------------------------------

Gambar 4.5 Paket data *video conference*

(Sumber: Hasil Analisis)

4.3.1.2 Delay CODEC

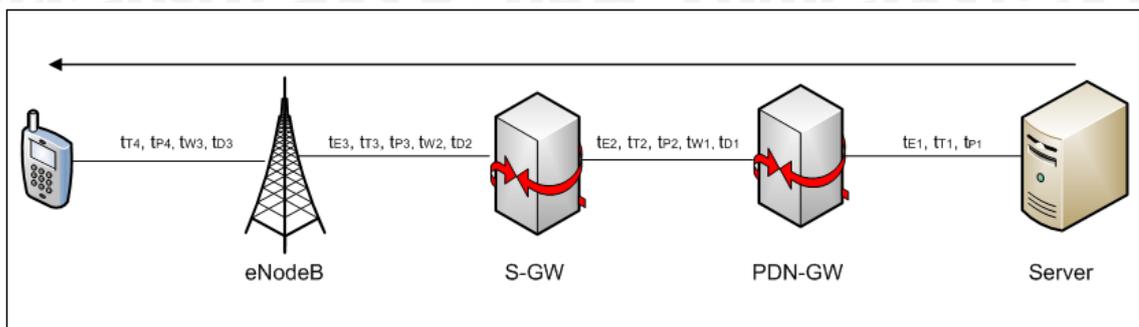
Delay CODEC pada penelitian ini adalah *delay* CODEC *audio* dan *video*. Dimana komunikasi yang digunakan bersifat *full-duplex* dengan *delay audio* CODEC G.711 sebesar 0,75ms dan *delay video* CODEC H.263 sebesar 150 ms. Sehingga *delay* CODEC untuk aplikasi *video conference* sesuai dengan persamaan (2-15):

$$\begin{aligned} t_{\text{CODEC}} &= 2 \times (t_a + t_v) \\ &= 2 \times (0.75 \text{ ms} + 150 \text{ ms}) \\ &= 301,5 \text{ ms} \end{aligned}$$

4.3.1.3 Delay Jaringan Long Term Evolution (LTE)

Delay yang ada pada jaringan LTE meliputi *delay* proses, *delay* transmisi, *delay* propagasi, dan *delay* antrian. Model hubungan *delay* jaringan pada LTE dapat dilihat pada Gambar 4.6.

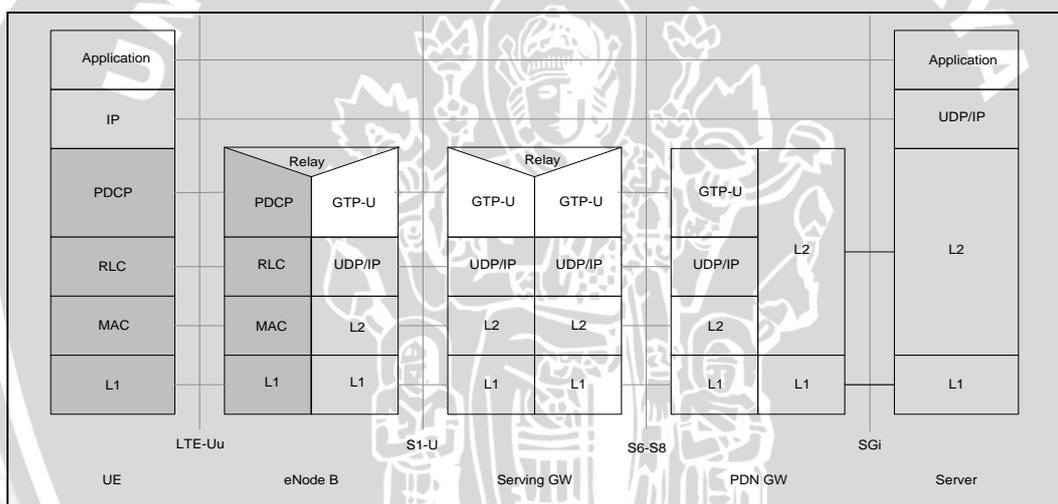




Gambar 4.6. Delay End to End pada LTE
(Sumber: Hasil analisis)

4.3.1.3.1 Delay Proses

Delay proses pada jaringan LTE meliputi *delay* enkapsulasi dan *delay* dekapsulasi yang terjadi pada setiap *node*. Sehingga dengan adanya format penambahan beberapa *header* pada tiap *node*. Perhitungan *delay* proses pada jaringan LTE berlaku untuk masing-masing *layer-layer* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.7



Gambar 4.7 Analisis *delay* enkapsulasi dan dekapsulasi pada jaringan LTE
(Sumber : Hasil Analisis)

Header yang digunakan dalam perhitungan *delay* proses sesuai dengan Gambar 4.7 ditunjukkan pada tabel 4.8

Tabel 4.8 Header Pada Jaringan LTE

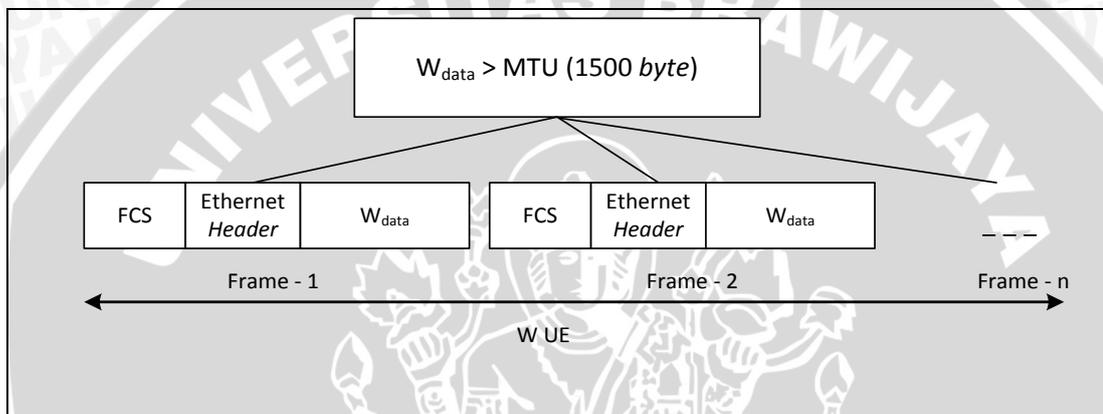
Header	Ukuran (byte)
Ethernet	14
FCS	4
GTP	8
UDP	8
IP	40
PDCP	2
RLC	2
MAC	3

(Sumber : Hasil Analisis)

➤ **Server**

Pada *server* terjadi proses enkapsulasi sebelum paket data ditransmisikan ke PDN-GW. Pada penelitian ini, standard protokol yang digunakan adalah *Ethernet* dengan *Maximum Transfer Unit (MTU Ethernet)* sebesar 1500 byte. Apabila panjang paket data melebihi *MTU Ethernet*, maka paket data akan difragmentasi menjadi beberapa buah *frame*. Jika paket data tidak melebihi *MTU Ethernet*, maka akan langsung ditambahkan dengan *header Ethernet* dan *FCS*.

Karena besar *payload video conference* melebihi *Maximum Transfer Unit (MTU)* sebesar 1500, *byte* maka akan dilakukan proses fragmentasi seperti tampak pada Gambar 4.8



Gambar 4.8 Format Fragmentasi *MTU Ethernet*

(Sumber : Hasil Analisis)

Sehingga jumlah *frame* yang siap ditransmisikan dapat dihitung dengan persamaan (2-23):

$$\begin{aligned}
 N_{\text{frame ethernet}} &= \frac{W_{VC\text{-size}}}{MTU} \\
 &= \frac{5752}{1500} \\
 &= 3,8347 \text{ frame}
 \end{aligned}$$

Terdapat 3 buah *frame* berisi data 1500 byte dan 1 buah *frame* berisi data sebesar $(0,8347 \times 1500 \text{ byte} = 1252,05 \text{ byte})$. Sehingga jumlah *frame* yang akan ditransmisikan berjumlah 4 dengan besarnya paket data yang dikirimkan dapat dihitung dengan persamaan (2-24):

$$\begin{aligned}
 W_{\text{frame server}} &= W_{VC\text{-size}} + [N_{\text{frame ethernet}} \times (H_{\text{Ethernet}} + H_{\text{UDP}} + H_{\text{IP}} + FCS)] \\
 &= 5752 + [4 \times (14 + 8 + 40 + 4)] \\
 &= 6016 \text{ byte}
 \end{aligned}$$

Dalam skripsi ini, pada *server* yang terhubung ke jaringan internet digunakan standar *interface Gigabit Ethernet* dengan kecepatan 1 Gbps. Sehingga *delay* enkapsulasi pada *server* didapatkan dengan persamaan (2-25), yaitu:

$$t_{E1} = \frac{W_{frame\ server} - W_{VC-size}}{C_{server}} \times 8$$

$$t_{E1} = \frac{6016 - 5752}{10^9} \times 8 = 2,112 \times 10^{-6} \text{ s}$$

➤ **PDN-GW (Packet Data Network Gateway)**

Pada PDN-GW, paket data yang diterima dari *server* mengalami proses dekapsulasi. Pada proses dekapsulasi, paket data didapatkan sesuai dengan persamaan (2-26) berikut.

$$W_{VC\ PDN-GW} = W_{frame\ server} - [N_{frame\ ethernet} \times (H_{Ethernet} + H_{UDP} + H_{IP} + FCS)]$$

$$W_{VC\ PDN-GW} = 6016 - [4 \times (14 + 8 + 40 + 4)] = 5752 \text{ byte}$$

Dengan mengasumsikan PDN-GW menggunakan standar Fast Ethernet dengan kecepatan 100 Mbps, maka besarnya *delay* dekapsulasi pada PDN-GW didapatkan sesuai dengan persamaan (2-27).

$$t_{D1} = \frac{W_{frame\ server} - W_{VC\ PDN-GW}}{C_{PDN-GW}} \times 8$$

$$t_{D1} = \frac{6016 - 5752}{10^8} \times 8 = 2,112 \times 10^{-5} \text{ s}$$

Payload data diberi penambahan header sesuai protokol yang digunakan yaitu GTP, UDP dan IP. Besar MSS (Maximum Segmen Size) dapat diperoleh sesuai dengan persamaan (2-28).

$$MSS = MTU - H_{GTP} - H_{UDP} - H_{IP}$$

$$MSS = 1500 - 8 - 8 - 40 = 1444 \text{ byte}$$

Selanjutnya, paket data yang melebihi MSS akan disegmentasi sesuai dengan persamaan (2-29):

$$N_{datagram} = \frac{W_{VC\ PDN-GW}}{MSS}$$

$$= \frac{5752}{1444}$$

$$= 3.9834 \text{ frame}$$

Terdapat 3 buah datagram IP berisi data 1444 byte dan 1 buah datagram IP berisi data sebesar $(0,9834 \times 1444 \text{ byte} = 1421 \text{ byte})$, sehingga terdapat 4 buah frame datagram IP. Kemudian, paket data aplikasi video *streaming* dienkapsulasi dengan penambahan *header* GTP (*GPRS Tunneling Protocol*), UDP (*User Datagram Protocol*), dan IP (*Internet Protocol*) sesuai dengan persamaan (2-30):

$$W_{\text{datagram}} = W_{VC \text{ PDN-GW}} + [N_{\text{datagram}} \times (H_{GTP} + H_{UDP} + H_{IP})]$$

$$W_{\text{datagram}} = 5752 + [4 \times (8 + 8 + 40)] = 5976 \text{ byte}$$

Karena panjang datagram IP melebihi *Maximum Transfer Unit* (MTU) *Ethernet* (1500 byte), maka datagram IP akan mengalami fragmentasi menjadi beberapa buah frame sesuai dengan persamaan (2-31):

$$\begin{aligned} N_{\text{frame ethernet}} &= \frac{W_{\text{datagram}}}{MTU} \\ &= \frac{5976}{1500} \\ &= 3,984 \text{ frame} \end{aligned}$$

Terdapat 3 buah frame Ethernet berisi data 1500 byte dan 1 buah frame Ethernet berisi data sebesar $(0,984 \times 1500 \text{ byte} = 1476 \text{ byte})$, sehingga terdapat 4 buah frame Ethernet. Sehingga, jumlah total *frame* pada PDN-GW yang dapat dikirimkan ke S-GW sesuai dengan persamaan (2-32):

$$W_{\text{frame PDN-GW}} = W_{\text{datagram}} + [N_{\text{frame ethernet}} \times (H_{\text{Ethernet}} + FCS)]$$

$$W_{\text{frame PDN-GW}} = 5976 + [4 \times (14 + 4)] = 6048 \text{ byte}$$

Dengan mengasumsikan bahwa PDN-GW menggunakan standar Fast Ethernet dengan kecepatan data 100 Mbps, maka besarnya delay enkapsulasi yang terjadi di PDN-GW yaitu sesuai persamaan (2-33):

$$t_{E2} = \frac{W_{\text{frame PDN-GW}} - W_{VC \text{ PDN-GW}}}{C_{\text{PDN-GW}}} \times 8$$

$$t_{E2} = \frac{6048 - 5752}{10^8} \times 8 = 2,368 \times 10^{-5} \text{ s}$$

➤ S-GW (*Serving Gateway*)

Besarnya paket data pada SG-W, diperoleh dari proses dekapsulasi paket data yang diterima dari PDN-GW. Sehingga besar paket data pada SG-W dapat dihitung dengan persamaan (2-34):

$$\begin{aligned}
 W_{VC S-GW} &= W_{frame PDN-GW} - [N_{datagram} \times (H_{GTP} + H_{UDP} + H_{IP})] - \\
 &\quad [N_{frame ethernet} \times (H_{Ethernet} + FCS)] \\
 &= 6048 - [4 \times (8 + 8 + 40)] - [4 \times (14 + 4)] \\
 &= 5752 \text{ byte}
 \end{aligned}$$

Dengan mengasumsikan bahwa S-GW menggunakan standar Fast Ethernet dengan kecepatan data 100 Mbps, maka besarnya delay dekapsulasi didapatkan dengan menggunakan persamaan (2-35) berikut.

$$\begin{aligned}
 t_{D2} &= \frac{W_{frame PDN-GW} - W_{VC S-GW}}{C_{S-GW}} \times 8 \\
 t_{D2} &= \frac{6048 - 5752}{10^8} \times 8 = 2,368 \times 10^{-5} \text{ s}
 \end{aligned}$$

Besar MSS dapat diperoleh sesuai dengan persamaan (2-36):

$$\begin{aligned}
 MSS &= MTU - H_{GTP} - H_{UDP} - H_{IP} \\
 MSS &= 1500 - 8 - 8 - 40 = 1444 \text{ byte}
 \end{aligned}$$

Selanjutnya, paket data yang melebihi MSS akan disegmentasi sesuai dengan persamaan (2-37):

$$\begin{aligned}
 N_{datagram} &= \frac{W_{VC S-GW}}{MSS} \\
 &= \frac{5752}{1444} \\
 &= 3,9834 \text{ frame}
 \end{aligned}$$

Terdapat 3 buah datagram IP berisi data 1444 byte dan 1 buah datagram IP berisi data sebesar $(0,9834 \times 1444 \text{ byte} = 1421 \text{ byte})$, sehingga terdapat 4 buah frame datagram IP. Kemudian, paket data aplikasi video streaming dienkapsulasi dengan penambahan header GTP (GPRS Tunneling Protocol), UDP (User Datagram Protocol), dan IP (Internet Protocol) sesuai dengan persamaan (2-38):

$$W_{datagram} = W_{VC S-GW} + [N_{datagram} \times (H_{GTP} + H_{UDP} + H_{IP})]$$

$$W_{datagram} = 5752 + [4 \times (8 + 8 + 40)] = 5976 \text{ byte}$$

Karena panjang datagram IP melebihi *Maximum Transfer Unit* (MTU) *Ethernet* (1500 byte), maka datagram IP akan mengalami fragmentasi menjadi beberapa buah frame sesuai dengan persamaan (2-39):

$$\begin{aligned}
 N_{frame\ ethernet} &= \frac{W_{datagram}}{MTU} \\
 &= \frac{5976}{1500} \\
 &= 3,984\ frame
 \end{aligned}$$

Terdapat 3 buah frame Ethernet berisi data 1500 byte dan 1 buah frame Ethernet berisi data sebesar (0,984 x 1500 byte = 1476 byte), sehingga terdapat 4 buah frame Ethernet. Sehingga, jumlah total *frame* pada PDN-GW yang dapat dikirimkan ke S-GW sesuai dengan persamaan (2-40):

$$W_{frame\ S-GW} = W_{datagram} + [N_{frame\ ethernet} \times (H_{Ethernet} + FCS)]$$

$$W_{frame\ S-GW} = 5976 + [4 \times (14 + 4)] = 6048\ byte$$

Sehingga delay enkapsulasi yang terjadi pada S-GW dapat dihitung dengan persamaan (2-41).

$$\begin{aligned}
 t_{E3} &= \frac{W_{frame\ S-GW} - W_{VC\ S-GW}}{C_{S-GW}} \times 8 \\
 t_{E3} &= \frac{6048 - 5752}{10^8} \times 8 = 2,368 \times 10^{-5}\ s
 \end{aligned}$$

➤ **eNodeB (Evolved Node B)**

Pada eNodeB paket data yang diterima dari S-GW didekapsulasi sesuai dengan persamaan (2-42) berikut.

$$\begin{aligned}
 W_{VC\ eNodeB} &= W_{frame\ S-GW} - [N_{datagram} \times (H_{GTP} + H_{UDP} + H_{IP})] - \\
 &\quad [N_{frame\ ethernet} \times (H_{Ethernet} + FCS)]
 \end{aligned}$$

$$W_{VC\ eNodeB} = 6048 - [4 \times (8 + 8 + 40)] - [4 \times (14 + 4)] = 5752\ byte$$

eNodeB menggunakan *interface* transmisi STM-1 dengan kecepatan 155,52 Mbps. *Delay* dekapsulasi yang terjadi di eNB adalah sesuai dengan persamaan (2-43).

$$\begin{aligned}
 t_{D3} &= \frac{W_{frame\ S-GW} - W_{VC\ eNodeB}}{C_{eNodeB}} \times 8 \\
 t_{D3} &= \frac{6048 - 5752}{155,52 \times 10^6} \times 8 = 1,5226 \times 10^{-5}\ s
 \end{aligned}$$

Pada *layer* PDCP (*Packet Data Convergence Protocol*), paket datagram IP video *conference* dien kapsulasi dengan penambahan *header* sebesar 1 byte, yaitu



header PDU. Banyaknya paket IP pada eNodeB dapat diperoleh dengan persamaan (2-44):

$$\begin{aligned} N_{\text{datagram}} &= \frac{W_{VC \text{ eNodeB}}}{MTU} \\ &= \frac{5752}{1500} \\ &= 3,8347 \text{ frame} \end{aligned}$$

Terdapat 3 buah datagram IP berisi data 1500 *byte* dan 1 buah datagram IP berisi data sebesar (0,8347 x 1500 *byte* = 1253 *byte*), sehingga terdapat 4 buah *frame* datagram IP. Kemudian pada *layer* PDCP, panjang *frame* ditambahkan dengan *header* PDCP sebesar 1 *byte*. Panjang *frame* PDCP dihitung sesuai dengan persamaan (2-45):

$$\begin{aligned} W_{\text{frame PDCP}} &= W_{VC \text{ eNodeB}} + [N_{\text{datagram}} \times H_{\text{PDCP}}] \\ &= 5752 + [4 \times 2] \\ &= 5760 \text{ byte} \end{aligned}$$

Selanjutnya pada *layer* RLC (*Radio Link Control*), *frame* PDCP disegmentasi menjadi RLC PDU *fixed size* sebesar 40 *byte*. Sehingga jumlah *frame* RLC dapat dihitung sesuai dengan persamaan (2-46):

$$\begin{aligned} N_{\text{frame RLC}} &= \frac{W_{\text{frame PDCP}}}{40 \text{ byte}} \\ &= \frac{5760}{40} \\ &= 144 \text{ frame} \end{aligned}$$

Terdapat 144 buah *frame* data berisi 40 *byte*. Setiap *frame* selanjutnya diberi *header* sebesar 2 *byte*, sehingga panjang setiap *frame* RLC sebesar 42 *byte*. Panjang *frame* RLC total yang siap diteruskan ke *layer* MAC (*Medium Access Control*) dihitung sesuai dengan persamaan (2-47):

$$\begin{aligned} W_{\text{frame RLC}} &= N_{\text{frame RLC}} \times W_{\text{frame RLC}} \\ &= 144 \times 42 \\ &= 6048 \text{ byte} \end{aligned}$$

Pada *layer* MAC, RLC disegmentasi menjadi MAC SDU (*Service Data Unit*) sebesar 42 *byte*. Jumlah *frame* SDU dihitung sesuai dengan persamaan (2-48):

$$\begin{aligned} N_{\text{frame MAC}} &= \frac{W_{\text{frame RLC}}}{42 \text{ byte}} \\ &= \frac{6048}{42} \end{aligned}$$

$$= 144 \text{ frame}$$

Sedangkan panjang *frame* MAC dihitung dengan menggunakan persamaan (2-49):

$$\begin{aligned} W_{\text{frameMAC}} &= H_{\text{MAC}} + 42 \text{ byte} \\ &= 3 + 42 \\ &= 45 \text{ byte} \end{aligned}$$

Panjang *frame* yang siap ditransmisikan menuju UE merupakan panjang *frame* MAC total, dihitung sesuai dengan persamaan (2-50):

$$\begin{aligned} W_{\text{frame eNodeB}} &= N_{\text{frame MAC}} \times W_{\text{frame MAC}} \\ &= 144 \times 45 \\ &= 6480 \text{ byte} \end{aligned}$$

Sehingga besar *delay* dekapsulasi yang terjadi pada eNodeB didapatkan dengan menggunakan persamaan (2-51):

$$\begin{aligned} t_{E4} &= \frac{W_{\text{frameNodeB}} - W_{\text{VCeNodeB}}}{C_{\text{eNodeB}}} \times 8 \\ &= \frac{6480 - 5752}{155,52 \cdot 10^6 \text{ bps}} \times 8 \\ &= 3,7449 \cdot 10^{-5} \text{ s} \end{aligned}$$

➤ **UE (User Equipment)**

Pada UE paket data dari eNB didekapsulasi untuk mendapatkan paket data. Proses dekapsulasi tersebut sesuai dengan persamaan (2-52) berikut.

$$W_{\text{VCUE}} = W_{\text{frame eNodeB}} - (N_{\text{datagram}} \times H_{\text{PDCP}}) - (N_{\text{frame RLC}} \times H_{\text{RLC}}) - (N_{\text{frame MAC}} \times H_{\text{MAC}})$$

$$W_{\text{VCUE}} = 6480 - (4 \times 2) - (144 \times 2) - (144 \times 3) = 5752 \text{ byte}$$



Tabel 4.9 Parameter *Data Rate* LTE pada Kanal 10 MHz

Modulation	Bits/symbol	Data Rate (Mbps) at 10 MHz Channel
QPSK ½	1	7,4
QPSK ¾	1,5	11,1
16-QAM ½	2	14,9
16-QAM ¾	3	22,3
64-QAM 2/3	4	29,8
64-QAM ¾	4,5	33,5

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

Maka besar delay dekapsulasi yang terjadi pada UE dengan menggunakan modulasi QPSK ½ yang mempunyai *data rate* maksimum 7,4 Mbps sesuai Tabel 4.9 didapatkan sesuai dengan persamaan (2-53):

$$t_{D4} = \frac{W_{frame} eNodeB - W_{VCUE}}{C_{UE}} \times 8$$

$$t_{D4} = \frac{6480 - 5752}{7,4 \times 10^6} \times 8 = 7,8703 \times 10^{-4} \text{ s}$$

Sehingga besarnya *delay* proses (t_{proc}) total dihitung dengan persamaan (2-21):

$$t_{proses} = t_{E1} + t_{E2} + t_{E3} + t_{E4} + t_{D1} + t_{D2} + t_{D3} + t_{D4}$$

$$t_{proses} = 2,112 \times 10^{-6} + 2,368 \times 10^{-5} + 2,368 \times 10^{-5} + 3,7449 \times 10^{-5} + 2,112 \times 10^{-5} + 2,368 \times 10^{-5} + 1,5266 \times 10^{-5} + 7,8703 \times 10^{-4}$$

$$t_{proses} = 9,3397 \times 10^{-4} \text{ s}$$

Dengan cara yang sama didapatkan diperoleh nilai *delay* proses untuk berbagai jenis tipe modulasi yang lain. Hasil analisis ditunjukkan pada tabel 4.10

Tabel 4.10 Hasil Perhitungan *Delay* Proses

Modulasi	Data Rate (Mbps)	Delay Proses Total (s)
QPSK 1/2	7,4	$9,3397 \times 10^{-4}$
QPSK 3/4	11,1	$6,7163 \times 10^{-4}$
16-QAM 1/2	14,9	$5,3782 \times 10^{-4}$
16-QAM 3/4	22,3	$4,0811 \times 10^{-4}$
64-QAM 2/3	29,8	$3,4238 \times 10^{-4}$
64-QAM 3/4	33,5	$3,2080 \times 10^{-4}$

(Sumber: Hasil Perhitungan)

4.3.1.3.2 Delay Transmisi

Perhitungan *delay* transmisi pada jaringan LTE meliputi hubungan antara Server dan PDN-GW, PDN-GW dan S-GW, S-GW dan eNB, serta eNB dan UE.

➤ Delay Transmisi dari Server ke PDN-GW

Server dan PDN-GW dihubungkan dengan jaringan standar *Ethernet* yang memiliki kecepatan transmisi data 100 Mbps. Maka *delay* transmisi yang terjadi pada SGi *interface* dapat dihitung sesuai dengan persamaan (2-54).

$$t_{T1} = \frac{W_{frame\ server}}{C_{ethernet}} \times 8$$

$$t_{T1} = \frac{6016}{10^8} \times 8 = 4,8128 \times 10^{-4} \text{ s}$$

➤ Delay transmisi dari PDN-GW ke S-GW

Hubungan antara PDN-GW dan S-GW menggunakan *Fast Ethernet* dengan kecepatan transmisi data sebesar 100 Mbps. Sehingga nilai *delay* transmisi yang terjadi pada S-6-S8 *interface* sesuai dengan persamaan (2-54).

$$t_{T2} = \frac{W_{frame\ PDN-GW}}{C_{ethernet}} \times 8$$

$$t_{T2} = \frac{6048}{10^8} \times 8 = 4,8384 \times 10^{-4} \text{ s}$$

➤ Delay transmisi dari S-GW - eNodeB

Hubungan Hubungan antara S-GW dan eNB menggunakan *interface* sistem tranmisi digital STM-1 yang memberikan kecepatan data sebesar 155,52 Mbps. Sehingga nilai *delay* transmisi yang terjadi pada S1-U *interface* sesuai dengan persamaan (2-54).

$$t_{T3} = \frac{W_{frame\ S-GW}}{C_{STM-1}} \times 8$$

$$t_{T3} = \frac{6048}{155,52 \times 10^6} \times 8 = 3,1111 \times 10^{-4} \text{ s}$$

➤ Delay transmisi dari eNodeB - UE

Delay transmisi yang terjadi antara eNodeB dan UE bergantung pada data rate UE serta jumlah slot. Terminal pengguna diasumsikan memiliki *data rate* maksimum sebesar 7,4 Mbps pada modulasi QPSK 1/2. Jumlah slot ditentukan oleh chip rate LTE yaitu sebesar 3,84 Mcps. Chip rate sebesar 3,84 Mcps selanjutnya dibagi menjadi radio

frame 2 ms dan 10 ms. Satu slot terdiri dari 2560 *chip* dan banyaknya slot dapat dihitung menggunakan persamaan $n = \frac{(cr \times r_f)}{2560 \text{ chip}}$,

dengan:

n = banyaknya slot

cr = *chip rate*

r_f = *radio frame* (Harri Holma dan Otto Lehtien, 2009 : 353).

Banyaknya *time slot* untuk radio frame = 10 ms adalah

$$\begin{aligned} n &= \frac{(cr \times r_f)}{2560 \text{ chip}} \\ &= \frac{3,84 \cdot 10^6 \text{ cps} \times 10 \cdot 10^{-3}}{2560 \text{ chip}} \\ &= 15 \end{aligned}$$

Sehingga nilai *delay* transmisi yang terjadi sesuai dengan persamaan (2-54)

$$t_{T4} = \frac{W_{frame} e_{NodeB}}{n \times C_{UE}} \times 8$$

$$t_{T4} = \frac{6480}{15 \times 7,4 \times 10^6} \times 8 = 4,6703 \times 10^{-4} \text{ s}$$

Delay transmisi total dihitung dengan persamaan (2-55):

$$\begin{aligned} t_{T \text{ tot}} &= t_{T1} + t_{T2} + t_{T3} + t_{T4} \\ &= 4,8128 \times 10^{-4} \text{ s} + 4,8348 \times 10^{-4} \text{ s} + 3,1111 \times 10^{-4} \text{ s} + 4,6703 \times 10^{-4} \text{ s} \\ &= 1,7429 \times 10^{-3} \text{ s} \end{aligned}$$

Dengan cara yang sama didapatkan diperoleh nilai *delay* transmisi untuk berbagai jenis tipe modulasi yang lain. Hasil analisis ditunjukkan pada tabel 4.11

Tabel 4.11 Hasil perhitungan *Delay* Transmisi

Modulasi	Data Rate (Mbps)	Delay Transmisi Total (s)
QPSK 1/2	7,4	$1,7429 \times 10^{-3}$
QPSK 3/4	11,1	$1,5872 \times 10^{-3}$
16-QAM 1/2	14,9	$1,5078 \times 10^{-3}$
16-QAM 3/4	22,3	$1,4309 \times 10^{-3}$
64-QAM 2/3	29,8	$1,3918 \times 10^{-3}$
64-QAM 3/4	33,5	$1,3790 \times 10^{-3}$

(Sumber: Hasil Perhitungan)

4.3.1.3.3 Delay propagasi

Analisis perhitungan *delay* propagasi meliputi hubungan antara Server dan PDN-GW, PDN-GW dan S-GW, S-GW dan eNodeB, serta eNodeB dan UE, dimana propagasi antara *Server* hingga eNodeB menggunakan media *fiber optic*, sedangkan propagasi antara eNB dengan UE menggunakan media udara.

➤ **Delay propagasi dari Server ke PDN-GW**

Hubungan antara Server ke PDN-GW menggunakan *fiber optic* dengan jarak 2000 m. Nilai *delay* propagasi antara Server dengan PDN-GW dapat dihitung sesuai dengan persamaan (2-56).

$$t_{p1} = \frac{N_{frame\ ethernet} \times R}{c}$$
$$t_{p1} = \frac{4 \times 2000}{3 \times 10^8} = 2,6667 \times 10^{-5} \text{ s}$$

➤ **Delay propagasi dari PDN-GW ke S-GW**

Hubungan antara PDN-GW ke S-GW menggunakan *fiber optic* dengan jarak 3000 m. Nilai *delay* propagasi antara PDN-GW dengan S-GW sesuai dengan persamaan (2-56)

$$t_{p2} = \frac{N_{frame\ PDN-GW} \times R}{c}$$
$$t_{p2} = \frac{4 \times 3000}{3 \times 10^8} = 4 \times 10^{-5} \text{ s}$$

➤ **Delay propagasi dari S-GW ke eNodeB**

Hubungan antara S-GW ke eNodeB menggunakan *fiber optic* dengan jarak 400 m. Nilai *delay* propagasi antara PDN-GW dengan S-GW sesuai dengan persamaan (2-56)

$$t_{p3} = \frac{N_{frame\ S-GW} \times R}{c}$$
$$t_{p3} = \frac{4 \times 400}{3 \times 10^8} = 5,3333 \times 10^{-6} \text{ s}$$

➤ **Delay propagasi dari eNodeB ke UE**

Hubungan antara eNodeB ke UE menggunakan media udara dengan jarak 500 m. Nilai *delay* propagasi antara eNodeB dengan UE sesuai dengan persamaan (2-56)

$$t_{p4} = \frac{N_{frame\ eNodeB} \times R}{c}$$

$$t_{p4} = \frac{144 \times 1000}{3 \times 10^8} = 2,4 \times 10^{-4} \text{ s}$$

Delay propagasi total untuk jarak UE dengan eNodeB 2000m pada jaringan LTE terdiri dari penjumlahan *delay* propagasi yang terjadi pada tiap *interface* jaringan sesuai dengan persamaan (2-57):

$$\begin{aligned} t_{p \text{ tot}} &= t_{p1} + t_{p2} + t_{p3} + t_{p4} \\ &= 2,6667 \times 10^{-5} + 4 \times 10^{-5} + 5,3333 \times 10^{-6} + 2,4 \times 10^{-4} \\ &= 0,312 \times 10^{-3} \text{ s} \end{aligned}$$

Dengan menggunakan cara yang sama hasil perhitungan *delay* propagasi total untuk jarak UE dengan eNodeB yang berbeda dapat dilihat pada Tabel 4.12

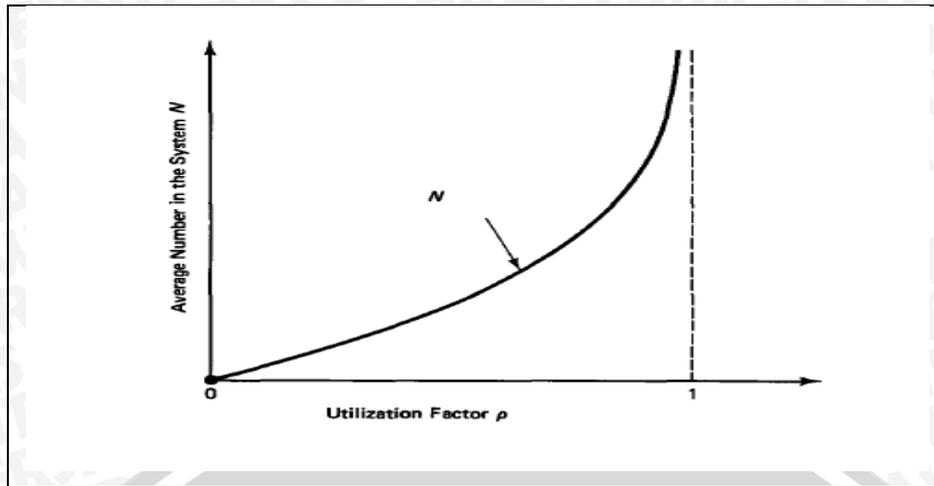
Tabel 4.12 Hasil perhitungan *Delay* Propagasi Total Dengan Jarak UE ke eNodeB Berbeda

Jarak (m)	Delay Propagasi Total (s)
500	$0,312 \times 10^{-3}$
1000	$0,552 \times 10^{-3}$
1114,4	$0,6069 \times 10^{-3}$
1318,1	$0,7047 \times 10^{-3}$
1500	$0,7920 \times 10^{-3}$
1771,7	$0,9224 \times 10^{-3}$
2000	$1,032 \times 10^{-3}$
2258,3	$1,156 \times 10^{-3}$
2500	$1,272 \times 10^{-3}$
2897,1	$1,4626 \times 10^{-3}$
3000	$1,512 \times 10^{-3}$
3383,5	$1,6961 \times 10^{-3}$

(Sumber: Hasil Perhitungan)

4.3.1.3.4 Delay antrian

Delay antrian terjadi pada PDN-GW, S-GW, eNodeB, dan UE dengan menggunakan model antrian M/M/1. Dalam analisis perhitungan *delay* antrian ini diasumsikan bahwa besar faktor utilisasi (ρ) berubah-ubah antara nilai 1/15 sampai dengan 14/15. Faktor utilisasi yang berubah-ubah mengindikasikan banyaknya *user* yang berada dalam antrian (Dimitri Bertsekas and Robert Gallager, 1987: 129) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.9



Gambar 4.9 Hubungan Antara Faktor *Utilisasi* Dengan Jumlah User
(Sumber: Dimitri Bertsekas and Robert Gallager, 1987: 129)

➤ **Delay antrian dari Server ke PDN-GW**

Pada PDN-GW digunakan standar *Fast Ethernet* dengan kecepatan 100 Mbps dengan paket data 6016 *byte*. Besar laju pelayanan paket data didapatkan sesuai dengan persamaan (2-59)

$$\begin{aligned} \mu_{PDN-GW} &= \frac{C_{PDN-GW}}{L} \\ &= \frac{10^8}{6016 \times 8} \\ &= 2077,7925 \text{ paket/s} \end{aligned}$$

Perhitungan laju kedatangan (λ) diperoleh dengan persamaan (2-61):

$$\begin{aligned} \lambda_{PDN-GW} &= \mu_{PDN-GW} \times \rho \\ &= 2077,7925 \times \frac{1}{15} \\ &= 138,5195 \end{aligned}$$

Sehingga *delay* antrian dapat dihitung dengan persamaan (2-62):

$$\begin{aligned} t_{w1} &= \frac{\lambda_{PDN-GW}}{\mu_{PDN-GW}(\mu_{PDN-GW} - \lambda_{PDN-GW})} + \frac{1}{\mu_{PDN-GW}} \\ &= \frac{138,5195}{2077,7925(2077,7925 - 138,5195)} + \frac{1}{2077,7925} \\ &= 5,1566 \times 10^{-4} \text{ s} \end{aligned}$$

➤ **Delay antrian dari PDN-GW ke S-GW**

Pada S-GW digunakan standar *Fast Ethernet* dengan kecepatan 100 Mbps dengan paket data 6048 *byte*. Besar laju pelayanan paket data didapatkan sesuai dengan persamaan (2-59):

$$\mu_{S-GW} = \frac{C_{S-GW}}{L}$$



$$\begin{aligned}
 &= \frac{10^8}{6048 \times 8} \\
 &= 2066,7989 \text{ paket/s}
 \end{aligned}$$

Laju kedatangan paket (λ) sesuai dengan persamaan (2-61)

$$\begin{aligned}
 \lambda_{S-GW} &= \mu_{S-GW} \times \rho_{S-GW} \\
 &= 2066,7989 \times \frac{1}{15} \\
 &= 137,7866 \text{ paket/s}
 \end{aligned}$$

Sehingga *delay* antrian dapat dihitung dengan persamaan (2-62):

$$\begin{aligned}
 t_{W2} &= \frac{\lambda_{S-GW}}{\mu_{S-GW}(\mu_{S-GW} - \lambda_{S-GW})} + \frac{1}{\mu_{S-GW}} \\
 &= \frac{137,7866}{2066,7989 (2066,7989 - 137,7866)} + \frac{1}{2066,7989} \\
 &= 5,184 \times 10^{-4} \text{ s}
 \end{aligned}$$

➤ **Delay antrian dari S-GW ke eNodeB**

Pada eNodeB *interface* sistem transmisi STM-1 yang memberikan kecepatan data sebesar 155,52 Mbps dengan paket data 6048 *byte*. Besar laju pelayanan paket data didapatkan sesuai dengan persamaan (2-59)

$$\begin{aligned}
 \mu_{eNodeB} &= \frac{C_{eNodeB}}{L} \\
 &= \frac{155,52 \cdot 10^6}{6048 \times 8} \\
 &= 3214,2857 \text{ paket/s}
 \end{aligned}$$

Laju kedatangan paket (λ) sesuai dengan persamaan (2-61)

$$\begin{aligned}
 \lambda_{eNodeB} &= \mu_{eNodeB} \times \rho \\
 &= 3214,2857 \times \frac{1}{15} \\
 &= 214,2857
 \end{aligned}$$

Sehingga *delay* antrian dapat dihitung dengan persamaan (2-62):

$$\begin{aligned}
 t_{W3} &= \frac{\lambda_{eNodeB}}{\mu_{eNodeB}(\mu_{eNodeB} - \lambda_{eNodeB})} + \frac{1}{\mu_{eNodeB}} \\
 &= \frac{214,2857}{3214,2857 (3214,2857 - 214,2857)} + \frac{1}{3214,2857} \\
 &= 3,3333 \times 10^{-4} \text{ s}
 \end{aligned}$$

➤ **Delay antrian dari eNodeB ke UE**

Pada UE dengan modulasi QPSK $\frac{1}{2}$ memiliki kecepatan data sebesar 7,4 Mbps dengan panjang data 6480 *byte*. Besar laju pelayanan paket data didapatkan sesuai dengan persamaan (2-59)

$$\begin{aligned}\mu_{UE} &= \frac{C_{UE}}{L} \\ &= \frac{7,4 \cdot 10^6}{6480 \times 8} \\ &= 142,7469 \text{ paket/s}\end{aligned}$$

Laju kedatangan paket (λ) sesuai dengan persamaan (2-61)

$$\begin{aligned}\lambda_{UE} &= \mu_{UE} \times \rho \\ &= 142,7469 \times \frac{1}{15} \\ &= 9,5165\end{aligned}$$

Sehingga *delay* antrian dapat dihitung dengan persamaan (2-62):

$$\begin{aligned}t_{w4} &= \frac{\lambda_{UE}}{\mu_{UE}(\mu_{UE} - \lambda_{UE})} + \frac{1}{\mu_{UE}} \\ &= \frac{9,5165}{142,7469(142,7469 - 9,5165)} + \frac{1}{142,7469} \\ &= 7,5085 \times 10^{-3} \text{ s}\end{aligned}$$

Delay antrian total yang terjadi pada jaringan LTE dengan modulasi QPSK $\frac{1}{2}$ dan faktor utilisasi $\frac{1}{15}$ sesuai dengan persamaan (2-63) adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}t_{w \text{ tot}} &= t_{w1} + t_{w2} + t_{w3} + t_{w4} \\ &= 5,1566 \times 10^{-4} + 5,184 \times 10^{-4} \text{ s} + 3,3333 \times 10^{-4} + 7,5085 \times 10^{-3} \\ &= 8,8764 \times 10^{-3} \text{ s}\end{aligned}$$

Delay antrian total untuk jenis tipe modulasi dan faktor utilisasi yang berbeda ditunjukkan pada Tabel 4.13

Tabel 4.13 Hasil perhitungan *Delay* Antrian

Jumlah User	Faktor Utilisasi	Delay Antrian Total (ms)					
		QPSK 1/2	QPSK ¾	16-QAM 1/2	16-QAM ¾	64-QAM 2/3	64-QAM ¾
1	1/15	8,8764	6,3735	5,0969	3,8595	3,2324	3,0265
2	2/15	9,5631	6,8666	5,4913	4,1581	3,4825	3,2606
3	3/15	10,3650	7,4424	5,9517	4,5068	3,7745	3,5340
4	4/15	11,3137	8,1236	6,4965	4,9193	4,1200	3,8575
5	5/15	12,4536	8,9421	7,1510	5,4149	4,5351	4,2462
6	6/15	13,8489	9,9440	7,9522	6,0216	5,0432	4,7219
7	7/15	15,5963	11,1987	8,9556	6,7813	5,6795	5,3177
8	8/15	17,8484	12,8157	10,2488	7,7605	6,4996	6,0855
9	9/15	20,8605	14,9786	11,9784	9,0703	7,5965	7,1126
10	10/15	25,0959	18,0197	14,4104	10,9118	9,1389	8,5566
11	11/15	31,4891	22,6103	18,0815	13,6916	11,4670	10,7365
12	12/15	42,2532	30,3393	24,2624	18,3719	15,3869	14,4066
13	13/15	64,1987	46,0969	36,8638	27,9139	23,3785	21,8891
14	14/15	133,5748	95,9113	76,7004	58,0789	48,6424	45,5434

(Sumber: Hasil Perhitungan)

4.3.1.3.5 *Delay end to end*

Perhitungan *delay* proses, *delay* transmisi, *delay* propagasi, dan *delay* antrian akan menghasilkan *delay end to end* jaringan. Sesuai dengan persamaan (2-16) didapatkan *delay* jaringan LTE yang menggunakan modulasi QPSK ½ dengan jarak 3385,3 m dan faktor utilisasi sebesar 1/15, yaitu:

$$\begin{aligned}
 t_{tot} &= t_{proses} + t_t total + t_p total + t_w total \\
 &= 9,3397 \times 10^{-4} + 1,7429 \times 10^{-3} + 1,6961 \times 10^{-3} + 8,8764 \times 10^{-3} \\
 &= 0,0132 \text{ s}
 \end{aligned}$$

Perhitungan *delay end to end* untuk aplikasi *video conference* sesuai dengan persamaan (2-14)

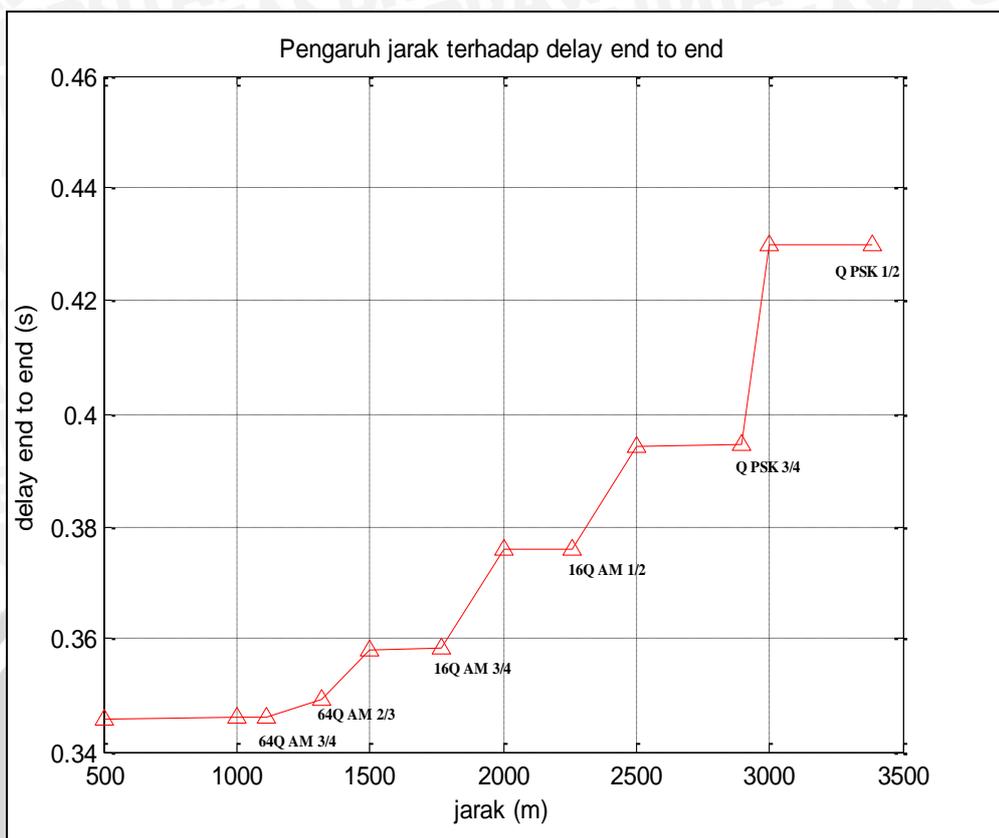
$$\begin{aligned}
 t_{end-to-end} &= t_{CODEC} + t_{tot} \\
 &= 301,5 \times 10^{-3} + 0,0132 \text{ s} \\
 &= 0,3147 \text{ s}
 \end{aligned}$$

Dengan cara yang sama perhitungan *delay end to end* dengan jumlah *user* yang berbeda serta jarak *user* dengan eNodeB yang berbeda ditunjukkan pada Tabel 4.14

Tabel 4.14 Hasil Perhitungan *Delay End to End*

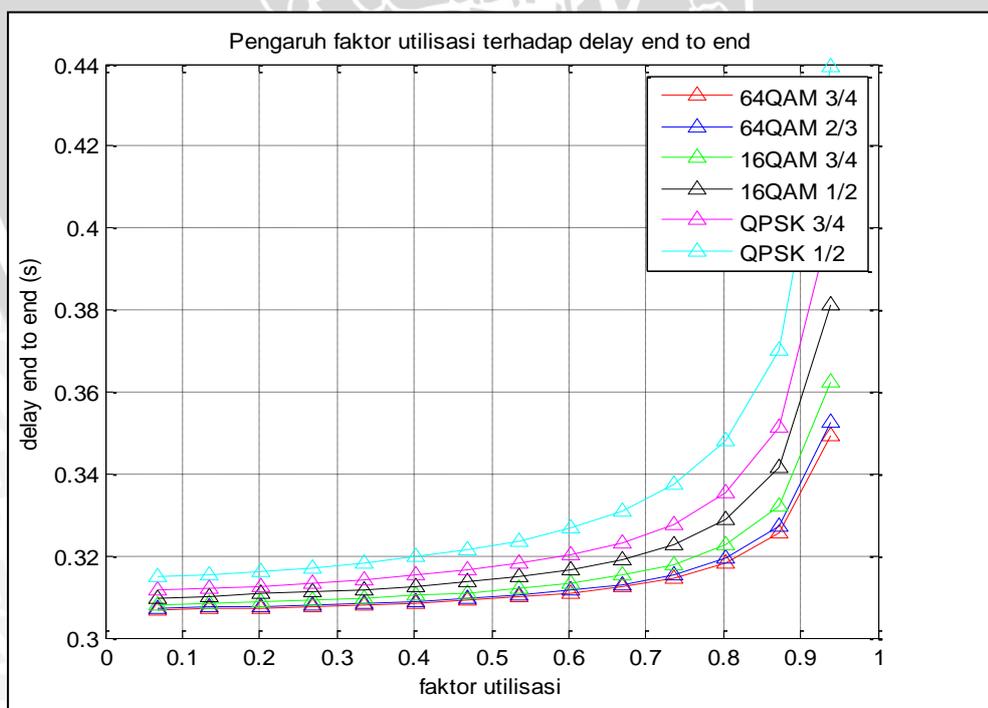
Jarak (m)	Modulasi	<i>Delay End to End (s)</i>													
		1/15	2/15	3/15	4/15	5/15	6/15	7/15	8/15	9/15	10/15	11/15	12/15	13/15	14/15
500	64-QAM 3/4	0,3065	0,3068	0,3070	0,3074	0,3077	0,3082	0,3088	0,3096	0,3106	0,3120	0,3141	0,3176	0,3247	0,3459
1000	64-QAM 3/4	0,3068	0,3070	0,3073	0,3076	0,3080	0,3085	0,3090	0,3098	0,3108	0,3122	0,3143	0,3179	0,3249	0,3461
1114,4	64-QAM 3/4	0,3068	0,3071	0,3073	0,3077	0,3080	0,3085	0,3091	0,3099	0,3109	0,3123	0,3144	0,3179	0,3250	0,3462
1318,1	64-QAM 2/3	0,3072	0,3074	0,3077	0,3081	0,3085	0,3090	0,3096	0,3104	0,3115	0,3130	0,3152	0,3190	0,3266	0,3492
1500	16-QAM 3/4	0,3080	0,3083	0,3086	0,3090	0,3095	0,3101	0,3109	0,3118	0,3131	0,3149	0,3176	0,3221	0,3311	0,3581
1771,7	16-QAM 3/4	0,3081	0,3084	0,3088	0,3092	0,3097	0,3103	0,3110	0,3120	0,3133	0,3151	0,3178	0,3223	0,3313	0,3583
2000	16-QAM 1/2	0,3097	0,3101	0,3105	0,3111	0,3117	0,3125	0,3135	0,3148	0,3165	0,3188	0,3224	0,3284	0,3402	0,3759
2258,3	16-QAM 1/2	0,3098	0,3102	0,3106	0,3112	0,3118	0,3126	0,3136	0,3149	0,3166	0,3190	0,3225	0,3285	0,3404	0,3760
2500	QPSK 3/4	0,3114	0,3119	0,3125	0,3131	0,3140	0,3149	0,3162	0,3178	0,3199	0,3229	0,3273	0,3348	0,3496	0,3942
2897,1	QPSK 3/4	0,3116	0,3121	0,3127	0,3133	0,3141	0,3151	0,3164	0,3180	0,3201	0,3231	0,3275	0,3350	0,3498	0,3944
3000	QPSK 1/2	0,3146	0,3152	0,3160	0,3170	0,3181	0,3195	0,3212	0,3234	0,3264	0,3305	0,3367	0,3471	0,3678	0,4299
3383,5	QPSK 1/2	0,3147	0,3154	0,3162	0,3172	0,3183	0,3197	0,3214	0,3236	0,3266	0,3307	0,3369	0,3473	0,3680	0,4301

(Sumber: Hasil Perhitungan)



Gambar 4.10 Grafik hubungan jarak eNodeB-UE dengan delay end to end dengan faktor utilisasi 1/15

(Sumber: Perhitungan)



Gambar 4.11 Grafik hubungan faktor utilisasi dengan delay end to end

(Sumber: Perhitungan)

Dari hasil analisis perhitungan dan grafik *delay end to end* di atas dapat kita ketahui bahwa:

1. Semakin besar jarak antara eNodeB dan UE mengakibatkan *delay end-to-end* semakin besar karena waktu yang digunakan paket saat melakukan transmisi semakin besar. Hal tersebut dapat dilihat dari meningkatnya *delay* propagasi seiring dengan penambahan jarak jangkauan. Selain itu semakin jauh jarak menyebabkan tingkat modulasi yang digunakan semakin rendah dimana semakin rendah tingkat modulasi, laju data semakin kecil sehingga menyebabkan *delay* proses, *delay* transmisi, dan *delay* antrian semakin besar.
2. Faktor utilisasi mempengaruhi besar kecilnya *delay end to end*, pada semua modulasi. Semakin besar nilai faktor utilisasi akan mengakibatkan besarnya *delay* antrian, hal ini dikarenakan faktor utilisasi menandakan rasio banyaknya pemakaian pada jaringan tersebut dalam waktu yang sama. Jadi semakin banyak jumlah *user*, maka semakin besar *delay end to end*.
3. Nilai *delay* yang melebihi standar (ITU.T G.114) sebesar 400 ms terjadi pada jarak antara UE dengan eNodeB lebih dari 3000 m untuk faktor utilisasi 14/15 Komunikasi dianggap gagal meskipun kualitas gambar atau suara yang dihasilkan cukup baik.

4.3.2 Probabilitas *packet loss video conference* pada jaringan LTE

Analisis probabilitas paket salah ini merupakan analisis probabilitas *bit* salah (*error bit probability*) P_{be} pada penerima besarnya dipengaruhi oleh perbandingan *energy bit* terhadap *noise* ($\frac{E_b}{N_o}$).

E_b/N_o dapat didefinisikan sebagai perbandingan energi sinyal per *bit* terhadap *noise* dan digunakan sebagai ukuran mutu standar untuk kinerja sistem komunikasi digital. Perhitungan nilai E_b/N_o akan digunakan untuk pengukuran nilai BER (*Bit Error Rate*). Besar E_b/N_o dapat diperoleh sesuai dengan persamaan (2-70) adalah sebagai berikut:

$$\frac{E_b}{N_o} = \frac{S}{N} + 10 \log \frac{B}{R}$$

Besarnya pengaruh redaman sinyal terhadap sinyal yang ditransmisikan dapat dinyatakan dengan perbandingan antara sinyal dengan *noise* (SNR) yang dihitung dengan persamaan (2-71)

$$\text{SNR} = \text{RSL} - N_o$$

Dimana nilai RSL telah dihitung sebelumnya dan besarnya daya *noise* sesuai dengan persamaan (2-72)

$$\begin{aligned} N_o &= 10 \log k.T + 10 \log B + NF \\ &= 10 \log (1000 \times 1,38 \times 10^{-23} \times 290) + 10 \log (10 \times 10^6) + 7 \\ &= -96,9772 \text{ dBm} \end{aligned}$$

Sehingga nilai SNR untuk jarak 500 m dan modulasi 64-QAM $\frac{3}{4}$ adalah

$$\begin{aligned} SNR &= -69,5380 - (-96,9772) \\ &= 26,4392 \text{ dB} \end{aligned}$$

Sehingga besar E_b/N_o adalah

$$\frac{E_b}{N_o} = 27,4392 + 10 \log \frac{10 \cdot 10^6}{33,5 \cdot 10^6}$$

$$\frac{E_b}{N_o} = 26,1888 \text{ dB}$$

Untuk perhitungan jarak yang berbeda dapat dilihat pada tabel

Tabel 4.15 Hasil Perhitungan *Energy bit per Noise Ratio*

Jarak (m)	Modulasi	SNR (dB)	E_b/N_o (dB)
500	64-QAM $\frac{3}{4}$	27,4392	26,1888
1000	64-QAM $\frac{3}{4}$	18,8925	17,6421
1114,4	64-QAM $\frac{3}{4}$	17,5	16,2496
1318,1	64-QAM $\frac{2}{3}$	15,3	14,5578
1500	16-QAM $\frac{3}{4}$	13,4915	13,0085
1771,7	16-QAM $\frac{3}{4}$	12,2	11,7169
2000	16-QAM $\frac{1}{2}$	9,4798	10,7479
2258,3	16-QAM $\frac{1}{2}$	7,9	9,1681
2500	QPSK $\frac{3}{4}$	6,2652	8,3119
2897,1	QPSK $\frac{3}{4}$	5,5	7,5468
3000	QPSK $\frac{1}{2}$	3,5721	7,3798
3383,5	QPSK $\frac{1}{2}$	2	5,8077

(Sumber: Hasil Perhitungan)

Perhitungan probabilitas BER pada jaringan LTE dengan pada jarak 500 m dengan modulasi 64-QAM $\frac{3}{4}$ dapat diperoleh sesuai dengan persamaan (2-68) adalah sebagai berikut:

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

Dengan $K = 4,5$

$$M = 2^K = 22,6274$$

$$P_{be} = \frac{4}{4,5} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{22,6275}} \right) Q \left(\sqrt{\frac{3 \times 4,5}{22,6274 - 1}} 26,1888 \right)$$

$$= 0,7020 Q(3,7216)$$

Dengan nilai (x) adalah 3,7216 maka dimasukkan ke persamaan dan diperoleh

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

$$Q(3,7216) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{3,7216}{\sqrt{2}} \right)$$

Dengan menggunakan program matlab nilai $\operatorname{erfc} \left(\frac{3,7216}{\sqrt{2}} \right)$ didapatkan $1,9793 \times 10^{-3}$ maka nilai $Q(3,7216) = 9,8965 \times 10^{-4}$ sehingga nilai $P_{be} = 0,7020 \times 9,8965 \times 10^{-4} = 1,8510 \times 10^{-5}$.

Untuk nilai BER pada jarak yang lainnya dapat dilihat pada tabel 4.16

Tabel 4.16 Hasil Perhitungan *Bit Error Rate* (BER)

Jarak (m)	Modulasi	BER
500	64-QAM $\frac{3}{4}$	$1,8510 \times 10^{-5}$
1000	64-QAM $\frac{3}{4}$	$3,1769 \times 10^{-4}$
1114,4	64-QAM $\frac{3}{4}$	$5,0841 \times 10^{-4}$
1318,1	64-QAM $\frac{2}{3}$	$2,4124 \times 10^{-4}$
1500	16-QAM $\frac{3}{4}$	$1,8619 \times 10^{-5}$
1771,7	16-QAM $\frac{3}{4}$	$4,4773 \times 10^{-5}$
2000	16-QAM $\frac{1}{2}$	$1,7729 \times 10^{-6}$
2258,3	16-QAM $\frac{1}{2}$	$9,2574 \times 10^{-6}$
2500	QPSK $\frac{3}{4}$	$3,2967 \times 10^{-6}$
2897,1	QPSK $\frac{3}{4}$	$8,8359 \times 10^{-6}$
3000	QPSK $\frac{1}{2}$	$1,4853 \times 10^{-6}$
3383,5	QPSK $\frac{1}{2}$	$1,7525 \times 10^{-5}$

(Sumber: Hasil Perhitungan)

Perhitungan probabilitas *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 LTE untuk jarak 500 m dengan tipe modulasi 64-QAM 3/4 sesuai dengan persamaan berikut:

$$\rho_{LTE} = P_{be} = 1,8510 \times 10^{-5}$$

Maka probabilitas *packet loss* total adalah

$$\rho_{total} = 1 - [(1 - \rho_{vicon})(1 - \rho_{LTE})]$$

$$\rho_{total} = 1 - [(1 - 10^{-4})(1 - 1,8510 \times 10^{-5})] = 1,1851 \times 10^{-4}$$

Prosentase *packet loss* total yang terjadi dihitung dengan menggunakan persamaan

$$\text{packet loss (\%)} = \frac{N_{\text{packet loss}}}{N_{\text{packet}} + N_{\text{packet loss}}} \times 100\%$$

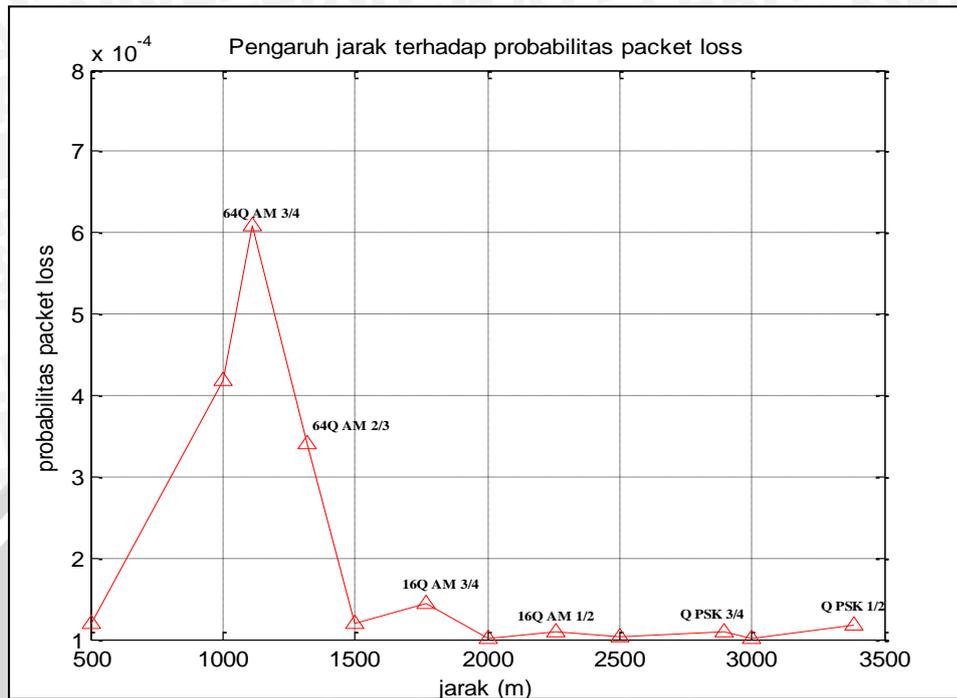
$$\text{packet loss (\%)} = \frac{6,1435}{6,1435 + (5758 \times 8)} \times 100\% = 0,0133\%$$

Tabel 4.17 Hasil Perhitungan Probabilitas *Packet Loss*

Jarak (m)	Modulasi	Probabilitas Packet Loss	Packet Loss (%)
500	64-QAM 3/4	$1,1851 \times 10^{-4}$	0.0133
1000	64-QAM 3/4	$4,1767 \times 10^{-4}$	0,0470
1114,4	64-QAM 3/4	$6,0836 \times 10^{-4}$	0,0685
1318,1	64-QAM 2/3	$3,4122 \times 10^{-4}$	0,0384
1500	16-QAM 3/4	$1,1862 \times 10^{-4}$	0,0133
1771,7	16-QAM 3/4	$1,4477 \times 10^{-4}$	0,0163
2000	16-QAM 1/2	$1,0177 \times 10^{-4}$	0,0115
2258,3	16-QAM 1/2	$1,0926 \times 10^{-4}$	0,0123
2500	QPSK 3/4	$1,0329 \times 10^{-4}$	0,0116
2897,1	QPSK 3/4	$1,0884 \times 10^{-4}$	0,0123
3000	QPSK 1/2	$1,0149 \times 10^{-4}$	0,0114
3383,5	QPSK 1/2	$1,1752 \times 10^{-4}$	0,0132

(Sumber: Hasil Perhitungan)





Gambar 4.12 Grafik hubungan jarak eNodeB-UE dengan probabilitas *packet loss* (Sumber: Hasil Perhitungan)

Dari analisis perhitungan dan grafik probabilitas *packet loss* di atas, dapat kita ketahui bahwa:

1. Semakin besar jarak antara UE dengan eNodeB, maka semakin besar probabilitas *packet loss* untuk tipe modulasi yang sama. Ini dapat dilihat pada modulasi 64QAM $\frac{3}{4}$ untuk jarak 500-1114,4 m.
2. Pada saat terjadi perubahan tipe modulasi yang lebih rendah, terjadi penurunan probabilitas *packet loss*. Hal ini dikarenakan semakin rendah tingkat modulasi, maka semakin besar daya tahan terhadap interferensi dan *noise*.
3. Hasil prosentase *packet loss video conference* pada jaringan LTE masih masuk dalam range standar (ITU.T G.114) yaitu sebesar 1%.

4.3.3 Throughput Video Conference pada Jaringan LTE

Throughput merupakan parameter yang digunakan untuk mengetahui jumlah paket yang diterima dalam keadaan baik terhadap waktu total transmisi yang dibutuhkan dari *server* hingga ke *end user*. Analisis perhitungan *throughput* yang dilakukan dalam penelitian ini adalah hubungan antara *server* hingga ke UE. Besarnya *throughput* pada jaringan LTE untuk jarak sebesar 500 m dapat diperoleh sesuai dengan persamaan (2-73) sebesar :

$$\lambda = \frac{1-\rho}{t_t[1+(\alpha-1)\rho]}$$

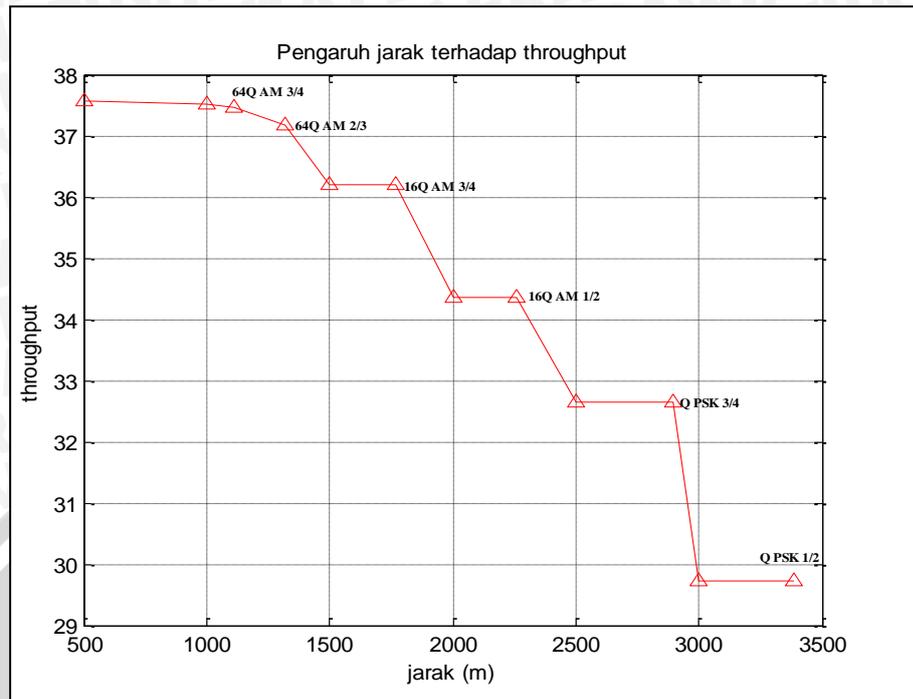
$$\lambda = \frac{1-1,6948 \times 10^{-4}}{1,3790 \times 10^{-3} \left[1 + \left(3 + \frac{2 \times 0,312 \times 10^{-3}}{1,3790 \times 10^{-3}} - 1 \right) 1,6948 \times 10^{-4} \right]}$$

$$\lambda = 724,4086 \times 6480 \times 8 = 37,5619 \text{ Mbps}$$

Tabel. 4.18 Hasil Perhitungan *Throughput*

Jarak (m)	Modulasi	Throughput (Mbps)
500	64-QAM 3/4	37,5533
1000	64-QAM 3/4	37,5065
1114,4	64-QAM 3/4	37,4704
1318,1	64-QAM 2/3	37,1723
1500	16-QAM 3/4	36,1992
1771,7	16-QAM 3/4	36,1934
2000	16-QAM 1/2	34,3538
2258,3	16-QAM 1/2	34,3518
2500	QPSK 3/4	32,6345
2897,1	QPSK 3/4	32,6327
3000	QPSK 1/2	29,7201
3383,5	QPSK 1/2	29,7167

(Sumber: Hasil Perhitungan)



Gambar 4.13 Grafik hubungan jarak eNodeB-UE dengan *throughput*

(Sumber: Hasil Perhitungan)

Dari analisis perhitungan dan grafik *throughput* di atas, dapat kita ketahui bahwa:

1. Jarak antara eNodeB dan UE mempengaruhi besarnya *throughput*. Semakin besar jarak maka *throughput* yang dihasilkan akan semakin kecil. Hal ini dikarenakan semakin besar jarak antara eNodeB dan UE akan menyebabkan nilai *delay* propagasi meningkat.
2. Penggunaan modulasi mempengaruhi jauh tidaknya jarak jangkauan eNodeB dan UE. Semakin jauh jarak jangkauan eNodeB-UE maka akan menurunkan nilai *throughput* sistem sehingga informasi berupa video yang dikirimkan memiliki kualitas yang kurang baik dibandingkan dengan jarak jangkauan eNodeB-UE yang dekat.

