

## BAB IV

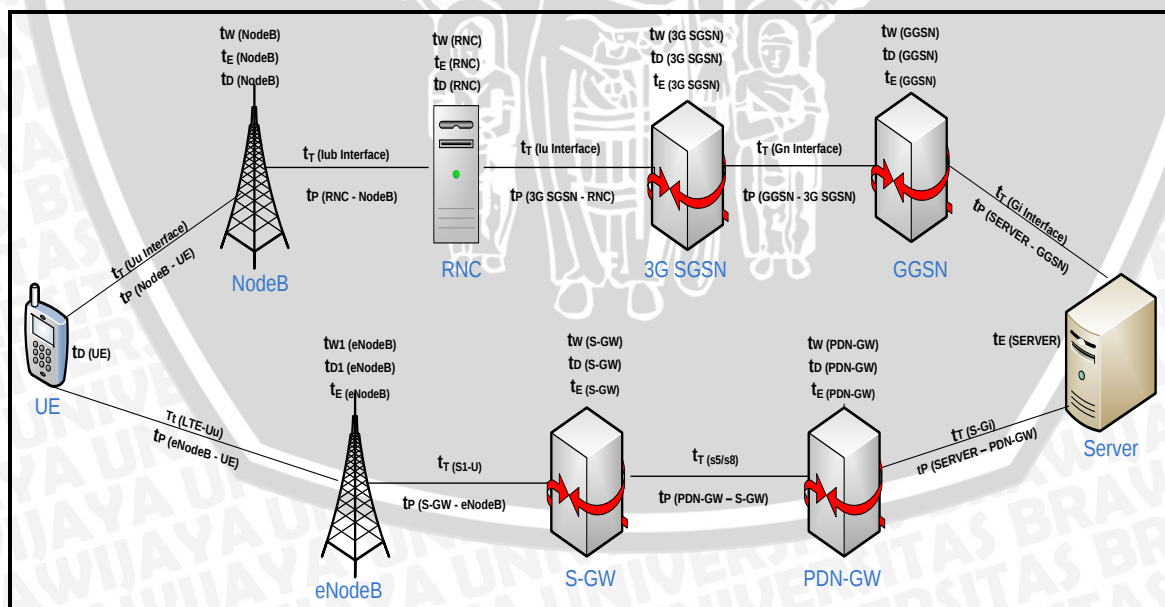
### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Umum

Pembahasan dan analisis yang dilakukan pada bab ini adalah tentang pengaruh *handover* pada jaringan LTE ke UMTS untuk layanan *Video Streaming*. Untuk itu ada beberapa tahap pembahasan dan analisis yang dilakukan:

1. Analisis kinerja terhadap jaringan UMTS dan LTE yang digunakan, yaitu dengan menghitung nilai masing-masing *delay* (*delay* enkapsulasi/dekapsulasi, *delay* transmisi, *delay* propagasi, *delay* antrian) selama perjalanan paket multimedia *Video Streaming*. Analisis yang akan diperhitungkan pada jaringan UMTS meliputi analisis *delay* dan *throughput* di *Node B*, *RNC*, *SGSN*, *GGSN*, dan *Server*. Pada jaringan LTE parameter analisis meliputi perhitungan *delay* dan *throughput* pada *eNodeB*, *S-GW*, *PDN-GW*, dan *Server*.
2. Analisis *delay handover* yang terjadi selama proses *handover* dan pengaruhnya terhadap *throughput*.

Analisis *delay* dalam jaringan dihitung mulai dari *Server* sampai dengan *UE* dapat diilustrasikan dalam Gambar 4.1.



Gambar 4.1. Delay End to End pada LTE dan UMTS  
(Sumber: Hasil analisis)

#### 4.2 Paket Data Aplikasi Video Streaming

Aplikasi video *streaming* menggunakan jenis CODEC H.264/AVC untuk video dengan *bit rate* CODEC antara 64 – 384 kbps dan AMR-WB+ untuk audio dengan *bit rate* CODEC antara 5,2 – 48 kbps dengan *frame rate* 33 ms.

Dengan menggunakan persamaan 2-1 hingga 2-2, maka besar *payload* aplikasi video *streaming* dapat diperoleh sebagai berikut:

$$\begin{aligned} PL_a &= B_{CODEC_a} \times f_R = (48.10^3) \times (33.10^{-3}) \\ &= 1584 \text{ bit} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} PL_v &= B_{CODEC_v} \times f_R = (384.10^3) \times (33.10^{-3}) \\ &= 12672 \text{ bit} \end{aligned}$$

Jumlah paket video dan audio yang akan di kodekan dipengaruhi oleh besar *payload* maksimum dari video maupun audio, seperti yang telah ditunjukkan pada tabel 2.2. Sehingga, jumlah paket video dan audio dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan 2-3 dan 2-5 adalah sebagai berikut:

$$P_a = PL_a / PL_{a_{\max}} = 1584 / 368 = 4,304 \approx 5 \text{ paket per second}$$

$$P_v = PL_v / PL_{v_{\max}} = 12672 / 2032 = 6,2362 \approx 7 \text{ paket per second}$$

Dengan menggunakan persamaan 2-4 dan 2-6, maka besar paket audio dan video aplikasi video *streaming* yang dihasilkan dapat dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned} Pa\text{-size} &= PL_a + P_a \times (H_{RTP} + H_{UDP} + H_{IP}) \\ &= 1584 + 5 \times (96 + 64 + 320) \\ &= 3984 \text{ bit} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Pv\text{-size} &= PL_v + P_v \times (H_{RTP} + H_{UDP} + H_{IP}) \\ &= 12672 + 7 \times (96 + 64 + 320) \\ &= 16032 \text{ bit} \end{aligned}$$

Besarnya paket data aplikasi video *streaming* yang akan ditransmisikan berdasarkan persamaan 2-7 adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} P_{vs\text{-size}} &= Pa\text{-size} + Pv\text{-size} \\ &= 3984 + 16032 \\ &= 20016 \text{ bit} = 2502 \text{ byte} = 2,502 \text{ kB} \end{aligned}$$

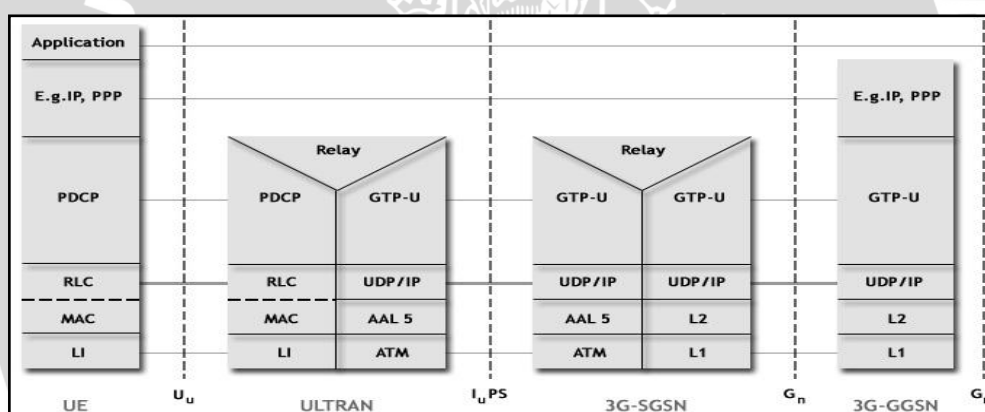
## 4.3 Performansi Jaringan UMTS/LTE

### 4.3.1 Analisis Delay

Dalam jaringan berbasis *packet switching*, *delay* yang terjadi merupakan penjumlahan *delay-delay* yang ada dalam perjalanan paket dari sumber ke tujuannya pada setiap *hop*. Analisis perhitungan *delay* pada jaringan LTE dan UMTS meliputi *delay* proses, *delay* transmisi, *delay* propagasi, dan *delay* antrian. Model hubungan perhitungan *delay* jaringan LTE adalah mulai dari *server* yang terhubung ke jaringan internet hingga UE.

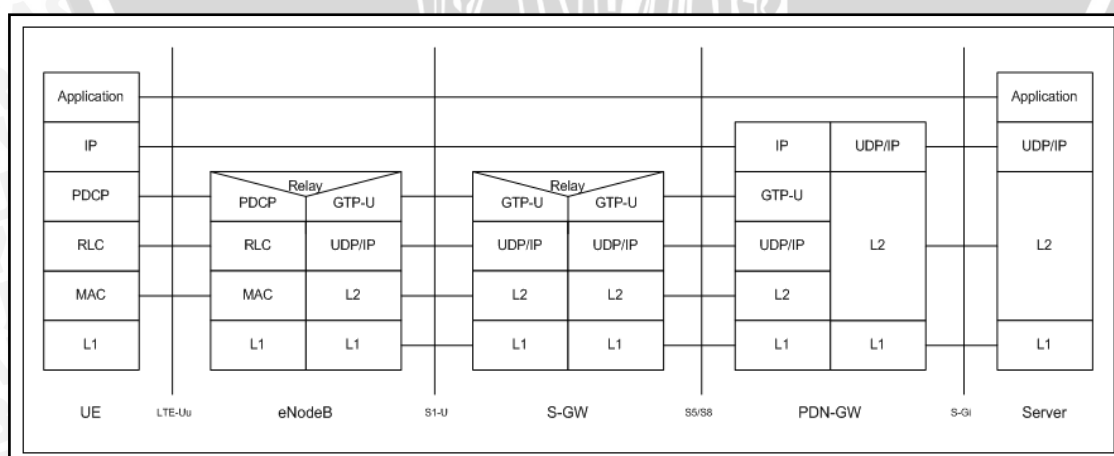
#### 4.3.1.1 Delay Proses

*Delay* proses pada jaringan LTE dan UMTS meliputi *delay* enkapsulasi dan *delay* dekapsulasi. Perhitungan *delay* proses pada jaringan LTE dan UMTS berlaku untuk masing-masing *layer-layer* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.2 dan Gambar 4.3.



**Gambar 4.2 :** User Plane Protocol Arsitektur UMTS.

(Sumber : Anonymous, *Wireless Cellular Network Technologies: 3G Mobile Telephony UMTS*, 2009)



**Gambar 4.3.** Delay enkapsulasi dan dekapsulasi pada Jaringan LTE  
(Sumber : Stefania Sesia, Issam Toufik and Matthew Baker, 2009)

### ➤ Server

Pada server terjadi proses enkapsulasi sebelum paket data ditransmisikan. Pada skripsi ini, standard protokol yang digunakan adalah Ethernet dengan MTU (*Maximum Transfer Unit*) Ethernet sebesar 1500 byte (RFC 895). Oleh karena itu, besar paket video *streaming* tidak boleh melebihi MTU sebesar 1500 byte.

Apabila panjang paket video *streaming* melebihi *Maximum Transfer Unit* (MTU) Ethernet sebesar 1500 byte (RFC 895), maka paket video *streaming* akan mengalami segmentasi menjadi beberapa buah frame baru ditambahkan dengan *header Ethernet* dan FCS. Jika *datagram* IP tidak melebihi MTU Ethernet, maka *datagram* IP akan langsung ditambahkan dengan *header Ethernet* dan FCS.

Banyaknya frame ethernet yang ditransmisikan sesuai dengan persamaan 2-17 sebagai berikut:

$$\begin{aligned} N_{frameEthernet} &= \frac{P_{VS-size}}{MTU} \\ &= \frac{2502byte}{1500byte} \\ &= 1,668 \end{aligned}$$

Terdapat 1 buah frame Ethernet berisi data 1500 byte dan 1 buah frame Ethernet berisi data sebesar (0,668 x 1500 byte = 1002 byte), sehingga terdapat 2 buah frame Ethernet. Selanjutnya, jumlah total *frame* pada jaringan internet yang dapat dikirimkan sesuai dengan persamaan 2-18:

$$\begin{aligned} W_{frame server} &= P_{VS-size} + [N_{frame Ethernet} \times (H_{UDP} + H_{IP} + H_{ethernet} + FCS)] \\ &= 2502 + [2 \times (8+40+14 + 4)] \\ &= 2634 \text{ byte} \end{aligned}$$

Dalam skripsi ini, pada *server* yang terhubung ke jaringan internet digunakan standar *interface Gigabit Ethernet* dengan kecepatan 1 Gbps. Sehingga *delay* dekapulasi pada *server* didapatkan dengan persamaaan 2-19, yaitu:

$$t_{E(server)} = \frac{W_{frame server}}{C_{server}} \times 8$$

$$\begin{aligned} &= \frac{2634byte}{10^9 bps} \times 8 \\ &= 2,1072 \cdot 10^{-5} s \end{aligned}$$

### ➤ GGSN (*Gateway GPRS Support Network*)

Pada GGSN, paket data yang diterima dari *server* mengalami proses dekapsulasi. Kemudian, sebelum paket data aplikasi video *streaming* ditransmisikan ke SGSN, dilakukan proses enkapsulasi terlebih dahulu.

Pada proses dekapsulasi, paket data aplikasi video *streaming* didapatkan sesuai dengan persamaan 2-20:

$$\begin{aligned} W_{VS \text{ GGSN}} &= W_{frame \text{ server}} - H_{UDP} - H_{IP} - H_{ethernet} - FCS \\ &= 2634 - [2 \times (8 + 40 + 14 + 4)] \\ &= 2502 \text{ byte} \end{aligned}$$

Dengan mengasumsikan GGSN menggunakan standar *Fast Ethernet* dengan kecepatan 100 Mbps, maka besarnya *delay* dekapsulasi pada GGSN didapatkan sesuai dengan persamaan 2-21:

$$\begin{aligned} t_{D(GGSN)} &= \frac{W_{VS \text{ GGSN}}}{C_{GGSN}} \times 8 \\ &= \frac{2502}{10^8 \text{ bps}} \times 8 \\ &= 2,0016 \cdot 10^{-4} \text{ s} \end{aligned}$$

Besar MSS dapat diperoleh sesuai dengan persamaan berikut 2-22:

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

Selanjutnya, paket data yang melebihi MSS akan disegmentasi sesuai dengan persamaan 2-23:

$$\begin{aligned} N_{datagram} &= \frac{W_{VS(GGSN)}}{MSS} \\ &= \frac{2502 \text{ byte}}{1444 \text{ byte}} \\ &= 1,7327 \end{aligned}$$

Terdapat 1 buah datagram IP berisi data 1444 byte dan 1 buah datagram IP berisi data sebesar  $(0,7327 \times 1444 \text{ byte} = 1058,15 \text{ byte})$ , sehingga terdapat 2 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 2-24:

$$\begin{aligned} W_{\text{datagram}} &= W_{\text{VS GGSN}} + [N_{\text{datagram}} \times (H_{\text{GTP}} + H_{\text{UDP}} + H_{\text{IP}})] \\ &= 2502 + [2 \times (8 + 8 + 40)] \\ &= 2614 \text{ byte} \end{aligned}$$

Karena panjang datagram IP melebihi *Maximum Transfer Unit (MTU) Ethernet* (1500 byte), maka datagram IP akan mengalami segmentasi menjadi beberapa buah frame sesuai dengan persamaan 2-25:

$$\begin{aligned} N_{\text{frameEthernet}} &= \frac{W_{\text{datagram}}}{MTU_{\text{ethernet}}} \\ &= \frac{2614 \text{ byte}}{1500 \text{ byte}} \\ &= 1,7427 \end{aligned}$$

Terdapat 1 buah frame Ethernet berisi data 1500 byte dan 1 buah frame Ethernet berisi data sebesar  $(0,7427 \times 1500 \text{ byte} = 114,05 \text{ byte})$ , sehingga terdapat 2 buah frame Ethernet. Sehingga, jumlah total *frame* pada GGSN yang dapat dikirimkan ke SGSN sesuai dengan persamaan 2-26:

$$\begin{aligned} W_{\text{frame GGSN}} &= W_{\text{datagram}} + [N_{\text{frame Ethernet}} \times (H_{\text{ethernet}} + \text{FCS})] \\ &= 2614 + [2 \times (14 + 4)] \\ &= 2650 \text{ byte} \end{aligned}$$

Sehingga *delay* enkapsulasi pada GGSN didapatkan dengan persamaan 2-27:

$$\begin{aligned} t_{E(\text{GGSN})} &= \frac{W_{\text{frameGGSN}}}{C_{\text{GGSN}}} \times 8 \\ &= \frac{2650}{10^8 \text{ bps}} \times 8 \\ &= 2,12 \cdot 10^{-4} \text{ s} \end{aligned}$$

### ➤ SGSN (*Serving GPRS Support Node*)

Pada SGSN, paket data yang diterima dari GGSN mengalami proses dekapsulasi. Kemudian, sebelum paket data aplikasi video *streaming* ditransmisikan ke RNC, dilakukan proses enkapsulasi terlebih dahulu.

Pada proses dekapsulasi, paket data aplikasi video *streaming* didapatkan sesuai dengan persamaan 2-28:

$$W_{\text{VS(SGSN)}} = W_{\text{frameGGSN}} - H_{\text{GTP}} - H_{\text{UDP}} - H_{\text{IP}} - H_{\text{ethernet}} - \text{FCS}$$

$$\begin{aligned}
 &= 2650 - [2 \times (8 + 8 + 40 + 14 + 4)] \\
 &= 2502 \text{ byte}
 \end{aligned}$$

Dengan mengasumsikan SGSN menggunakan standar *Fast Ethernet* dengan kecepatan 100 Mbps, maka besarnya *delay* dekapsulasi pada SGSN didapatkan sesuai dengan persamaan 2-29:

$$\begin{aligned}
 t_{D(SGSN)} &= \frac{W_{VS(SGSN)}}{C_{SGSN}} \times 8 \\
 &= \frac{2502}{10^8 \text{ bps}} \times 8 \\
 &= 2,0016 \cdot 10^{-4} \text{ s}
 \end{aligned}$$

Besar MSS dapat diperoleh sesuai dengan persamaan 2-30:

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

Selanjutnya, paket data yang melebihi MSS akan disegmentasi sesuai dengan persamaan 2-31:

$$\begin{aligned}
 N_{\text{datagram}} &= \frac{W_{VSSGSN}}{\text{MSS}} \\
 &= \frac{2502 \text{ byte}}{1444 \text{ byte}} \\
 &= 1,7327
 \end{aligned}$$

Terdapat 1 buah datagram IP berisi data 1444 byte dan 1 buah datagram IP berisi data sebesar  $(0,7327 \times 1444 \text{ byte} = 1098,15 \text{ byte})$ , sehingga terdapat 2 buah frame datagram IP. Kemudian, paket data aplikasi video *streaming* dienkapsulasi dengan penambahan *header* GTP (*GPRS Tunneling Protocol*), UDP (*User Datagram Protocol*), IP (*Internet Protocol*), dan *header* AAL5 sesuai dengan persamaan 2-32:

$$\begin{aligned}
 W_{\text{frameAAL5}} &= W_{VSSGSN} + [N_{\text{datagram}} \times (H_{\text{GTP}} + H_{\text{UDP}} + H_{\text{IP}} + H_{\text{AAL5(PAD+CT)}})] \\
 &= 2502 + [2 \times (8 + 8 + 40 + 8)] \\
 &= 2630 \text{ byte}
 \end{aligned}$$

Pada *layer* ATM, *frame* AAL5 akan disegmentasi menjadi *fixed-size cells* ATM sebesar 53byte yang terdiri dari *payload* ATM sebesar 48byte dan *header* ATM sebesar 5byte (Stallings, 2001:363) sesuai dengan persamaan 2-33 berikut:

$$\begin{aligned} N_{frameATM} &= \frac{W_{frameAAL5}}{48} \\ &= \frac{2630byte}{48byte} \\ &= 54,8 \end{aligned}$$

Setelah tersegmentasi, *frame-frame* ini dienkapsulasi untuk disesuaikan dengan panjang *frame* ATM. Sehingga diperoleh panjang *frame* ATM masing-masing sesuai dengan persamaan 2-34:

$$\begin{aligned} W_{frameATM} &= Payload_{ATM} + header_{ATM} \\ &= 48byte + 5byte \\ &= 53byte \end{aligned}$$

Terdapat 54 *frame* berisi data 48 byte dan 1 *frame* berisi data sebesar (0,8 x 48 byte = 38,4 byte). *Frame* yang berisi data 38,4 byte tersebut akan diberi *padding bytes* sebesar (48 byte – 38,4 byte = 9,6 byte), sehingga terdapat 55 sel ATM. Selanjutnya setiap sel ATM diberi *header* ATM sebesar 5 byte sehingga panjang *frame* ATM menjadi 53 byte. Panjang *frame* di SGSN yang siap ditransmisikan menuju RAN merupakan panjang *frame* ATM total, yang sesuai dengan persamaan 2-35:

$$\begin{aligned} W_{frameSGSN} &= W_{frameATM\ total} = N_{frameATM} \times W_{frameATM} \\ &= 55 \times 53\ byte \\ &= 2915\ byte \end{aligned}$$

Sehingga, *delay* enkapsulasi yang terjadi pada SGSN didapat dengan persamaan 2-36 berikut:

$$t_{E(SGSN)} = \frac{W_{frameSGSN}}{C_{SGSN-RNC}} \times 8 = \frac{2915}{155,52 \times 10^6} \times 8 = 1,499 \times 10^{-4} s$$

### ➤ RAN (Radio Access Network)

Paket data yang diterima dari SGSN mengalami proses dekapsulasi pada RAN sesuai dengan persamaan 2-37:

$$\begin{aligned} W_{VS(RAN)} &= W_{frameSGSN} - H_{GTP} - H_{UDP} - H_{IP} - H_{AAL5} - H_{ATM} \\ &= 2915 - 2 \times 8 - 2 \times 8 - 2 \times 40 - 2 \times 8 - 55 \times 5 \\ &= 2512byte \end{aligned}$$

Pada RAN, digunakan *interface* sistem transmisi ATM STM-1 (*Synchronous Transport Module-1*) yang memberikan kecepatan data sebesar 155,52 Mbps. Nilai delay dekapsulasi pada RNC didapatkan dengan persamaan 2-38:

$$\begin{aligned} t_{D(RAN)} &= \frac{W_{VS(RAN)}}{C_{RAN}} \times 8 \\ &= \frac{2512}{155,52 \times 10^6 \text{ bps}} \times 8 \\ &= 1,2922 \cdot 10^{-4} \text{ s} \end{aligned}$$

Pada RAN, *frame* ATM disegmentasi menjadi PDCP Data PDU (*Protocol Data Unit*) dengan menambahkan *header* PDU *type* sebesar 3 bit dan PID (*Paket Identifier*) sebesar 5 bit, jadi total 8 bit atau 1byte (3GPP TS 22.323 Rel.5) sesuai persamaan 2-39:

$$\begin{aligned} W_{framePDCP} &= W_{VS RAN} + header_{PDCP} \\ &= 2512 \text{ byte} + 1 \text{ byte} \\ &= 2513 \text{ byte} \end{aligned}$$

Pada *layer* RLC, PDCP Data PDU akan disegmentasi menjadi RLC PDU *fixed size* yaitu sebesar 40byte sesuai dengan persamaan 2-40:

$$\begin{aligned} N_{frameRLC} &= \frac{W_{framePDCP}}{40 \text{ byte}} \\ &= \frac{2513 \text{ byte}}{40 \text{ byte}} \\ &= 62,8 \end{aligned}$$

Sehingga besar paket data pada *frame* RLC dapat diketahui dengan persamaan 2-41 sebagai berikut:

$$\begin{aligned} W_{frameRLC} &= 40 \text{ byte} + header_{RLC} \\ &= 40 \text{ byte} + 2 \text{ byte} = 42 \text{ byte} \end{aligned}$$

Terdapat 62 *frame* berisi data 40 byte dan 1 *frame* berisi data sebesar (0,8 x 40 byte = 32 byte). *Frame* yang berisi data 32 byte tersebut akan diberi *padding bytes* sebesar (40 byte – 32 byte = 8 byte), sehingga terdapat 63 sel ATM. Selanjutnya setiap *frame* diberi *header<sub>RLC</sub>* sebesar 2byte, sehingga panjang *frame* RLC yang dikirimkan ke MAC sesuai dengan persamaan 2-42:

$$\begin{aligned} W_{frameRLC \text{ total}} &= N_{frameRLC} \times W_{frameRLC} \\ &= 63 \times 42 \text{ byte} \\ &= 2646 \text{ byte} \end{aligned}$$

Pada *layer* MAC, RLC PDU akan disegmentasi menjadi MAC SDU. Besarnya MAC SDU tergantung pada besarnya RLC PDU yang telah ditetapkan yaitu sebesar 42byte. Sehingga jumlah frame MAC SDU sesuai dengan persamaan 2-43:

$$\begin{aligned} N_{frameMAC} &= \frac{W_{frameRLCtotal}}{42byte} \\ &= \frac{2646byte}{42byte} \\ &= 63 \end{aligned}$$

Sehingga besar paket data pada *frame* MAC dapat diketahui dengan persamaan 2-44 berikut:

$$\begin{aligned} W_{frameMAC} &= header_{MAC} + 42byte + CRC \\ &= 3byte + 42byte + 2byte \\ &= 47 byte \end{aligned}$$

Sehingga panjang *frame* RAN yang siap dikirimkan ke UE sama dengan jumlah *frame* MAC total sesuai dengan persamaan 2-45:

$$\begin{aligned} W_{frameRAN} &= W_{frameMAC total} = N_{frameMAC} \times W_{frameMAC} \\ &= 63 \times 47 byte \\ &= 2961 byte \end{aligned}$$

Sehingga, *delay* enkapsulasi yang terjadi pada RAN didapat dengan persamaan 2-46 berikut:

$$\begin{aligned} t_{E(RAN)} &= \frac{W_{frameRAN}}{C_{RAN}} \times 8 \\ &= \frac{2961}{155,52 \times 10^6 bps} \times 8 \\ &= 1,523 \times 10^{-4} s \end{aligned}$$

#### ➤ UE (User Equipment)

Paket data yang diterima dari *Node B* mengalami proses dekapsulasi pada UE sesuai dengan persamaan 2-47:

$$\begin{aligned} W_{VS UE} &= W_{frameRAN} - H_{PDCP} - N_{frameMAC} \times (H_{MAC} - CRC - H_{RLC}) \\ &= 2961 - 2 \times 1 - 63 \times (3byte - 2byte - 2byte) \\ &= 2518 byte \end{aligned}$$

Sesuai dengan standart 3GPP, UMTS memiliki *data rate* maksimum sebesar 384 kbps, maka besar *delay* dekapsulasi yang terjadi di UE dapat dihitung dengan persamaan 2-48:

$$\begin{aligned} t_{D(UE)} &= \frac{W_{VS(UE)}}{C_{UE}} \times 8 \\ &= \frac{2518}{384 \times 10^3 \text{ bps}} \times 8 \\ &= 5,246 \times 10^{-2} \text{ s} \end{aligned}$$

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

Pada PDN-GW, paket data yang diterima dari *server* mengalami proses dekapsulasi. Pada proses dekapsulasi, paket data aplikasi video *streaming* didapatkan sesuai dengan persamaan 2-49:

$$\begin{aligned} W_{VS \text{ PDN-GW}} &= W_{\text{frame server}} - H_{\text{UDP}} - H_{\text{IP}} - H_{\text{ethernet}} - FCS \\ &= 2634 - [2 \times (8 + 40 + 14 + 4)] \\ &= 2502 \text{ byte} \end{aligned}$$

Dengan mengasumsikan PDN-GW menggunakan standar *Fast Ethernet* dengan kecepatan 100 Mbps, maka besarnya *delay* dekapsulasi pada PDN-GW didapatkan sesuai dengan persamaan 2-50:

$$\begin{aligned} t_{D(PDN-GW)} &= \frac{W_{VSPDN-GW}}{C_{PDN-GW}} \times 8 \\ &= \frac{2502}{10^8 \text{ bps}} \times 8 \\ &= 2,0016 \cdot 10^{-5} \text{ s} \end{aligned}$$

Besar MSS dapat diperoleh sesuai dengan persamaan berikut 2-51:

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

Selanjutnya, paket data yang melebihi MSS akan disegmentasi sesuai dengan persamaan 2-52:

$$N_{\text{datagram}} = \frac{W_{VSPDN-GW}}{MSS}$$

$$= \frac{2502 \text{ byte}}{1444 \text{ byte}} \\ = 1,7327$$

Terdapat 1 buah datagram IP berisi data 1444 byte dan 1 buah datagram IP berisi data sebesar  $(0,7327 \times 1444 \text{ byte} = 1098,15 \text{ byte})$ , sehingga terdapat 2 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 2-53:

$$W_{\text{datagram}} = W_{\text{VS PDN-GW}} + [N_{\text{datagram}} \times (H_{\text{GTP}} + H_{\text{UDP}} + H_{\text{IP}})] \\ = 2502 + [2 \times (8 + 8 + 40)] \\ = 2614 \text{ byte}$$

Karena panjang datagram IP melebihi *Maximum Transfer Unit* (MTU) *Ethernet* (1500 byte), maka datagram IP akan mengalami segmentasi menjadi beberapa buah frame sesuai dengan persamaan 2-54:

$$N_{\text{frame Ethernet}} = \frac{W_{\text{datagram}}}{MTU_{\text{ethernet}}} \\ = \frac{2614 \text{ byte}}{1500 \text{ byte}} \\ = 1,7427$$

Terdapat 1 buah frame Ethernet berisi data 1500 byte dan 1 buah frame Ethernet berisi data sebesar  $(0,7427 \times 1500 \text{ byte} = 114,05 \text{ byte})$ , sehingga terdapat 2 buah frame Ethernet. Sehingga, jumlah total *frame* pada PDN-GW yang dapat dikirimkan ke S-GW sesuai dengan persamaan 2-55:

$$W_{\text{frame PDN-GW}} = W_{\text{datagram}} + [N_{\text{frame Ethernet}} \times (H_{\text{ethernet}} + \text{FCS})] \\ = 2614 + [2 \times (14 + 4)] \\ = 2650 \text{ byte}$$

Sehingga *delay* enkapsulasi pada PDN-GW didapatkan dengan persamaan 2-56:

$$t_{E(\text{PDN-GW})} = \frac{W_{\text{frame PDN-GW}}}{C_{\text{PDN-GW}}} \times 8 \\ = \frac{2650}{10^8 \text{ bps}} \times 8 \\ = 2,12 \cdot 10^{-4} \text{ s}$$

### ➤ S-GW (*Serving Gateway*)

Pada S-GW, paket data yang diterima dari PDN-GW mengalami proses dekapsulasi. Kemudian, sebelum paket data aplikasi video *streaming* ditransmisikan ke eNodeB, dilakukan proses enkapsulasi terlebih dahulu.

Pada proses dekapsulasi, paket data aplikasi video *streaming* didapatkan sesuai dengan persamaan 2-57:

$$\begin{aligned} W_{VS(S-GW)} &= W_{framePDN-GW} - H_{GTP} - H_{UDP} - H_{IP} - H_{ethernet} - FCS \\ &= 2650 - [2 \times (8 + 8 + 40 + 14 + 4)] \\ &= 2502 \text{ byte} \end{aligned}$$

Dengan mengasumsikan S-GW menggunakan standar *Fast Ethernet* dengan kecepatan 100 Mbps, maka besarnya *delay* dekapsulasi pada S-GW didapatkan sesuai dengan persamaan 2-58:

$$\begin{aligned} t_{D(S-GW)} &= \frac{W_{VSS-GW}}{C_{S-GW}} \times 8 \\ &= \frac{2502}{10^8 \text{ bps}} \times 8 \\ &= 2,0016 \cdot 10^{-4} \text{ s} \end{aligned}$$

Besar MSS dapat diperoleh sesuai dengan persamaan 2-59:

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

Selanjutnya, paket data yang melebihi MSS akan disegmentasi sesuai dengan persamaan 2-60:

$$\begin{aligned} N_{datagram} &= \frac{W_{VSS-GW}}{MSS} \\ &= \frac{2502 \text{ byte}}{1444 \text{ byte}} \\ &= 1,7327 \end{aligned}$$

Terdapat 1 buah datagram IP berisi data 1444 byte dan 1 buah datagram IP berisi data sebesar  $(0,7327 \times 1444 \text{ byte} = 1098,15 \text{ byte})$ , sehingga terdapat 2 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 2-61:

$$\begin{aligned} W_{\text{datagram}} &= W_{\text{VSS-GW}} + [N_{\text{datagram}} \times (H_{\text{GTP}} + H_{\text{UDP}} + H_{\text{IP}})] \\ &= 2502 + [2 \times (8 + 8 + 40)] \\ &= 2614 \text{ byte} \end{aligned}$$

Karena panjang datagram IP melebihi MTU (Maximum Transfer Unit) Ethernet (1500 byte), maka datagram IP akan mengalami segmentasi menjadi beberapa buah frame sesuai dengan persamaan 2-62:

$$\begin{aligned} N_{\text{frameEthernet}} &= \frac{W_{\text{datagram}}}{MTU_{\text{ethernet}}} \\ &= \frac{2614 \text{ byte}}{1500 \text{ byte}} \\ &= 1,7427 \end{aligned}$$

Terdapat 1 buah frame Ethernet berisi data 1500 byte dan 1 buah frame Ethernet berisi data sebesar  $(0,7427 \times 1500 \text{ byte} = 1114,05 \text{ byte})$ , sehingga terdapat 2 buah frame Ethernet. Sehingga, jumlah total *frame* pada S-GW yang dapat dikirimkan ke eNodeB sesuai dengan persamaan 2-63:

$$\begin{aligned} W_{\text{frame S-GW}} &= W_{\text{datagram}} + [N_{\text{frame Ethernet}} \times (H_{\text{ethernet}} + \text{FCS})] \\ &= 2614 + [2 \times (14 + 4)] \\ &= 2650 \text{ byte} \end{aligned}$$

Sehingga *delay* enkapsulasi pada S-GW didapatkan dengan persamaan 2-64:

$$\begin{aligned} t_{E(S-GW)} &= \frac{W_{\text{frameS-GW}}}{C_{S-GW}} \times 8 \\ &= \frac{2650}{10^8 \text{ bps}} \times 8 \\ &= 2,12 \cdot 10^{-4} \text{ s} \end{aligned}$$

#### ➤ eNodeB (Evolved Node B)

Pada eNodeB, paket data yang diterima dari S-GW mengalami proses dekapsulasi. Kemudian, sebelum paket data aplikasi video *streaming* ditransmisikan ke UE, dilakukan proses enkapsulasi terlebih dahulu.

Pada proses dekapsulasi, paket data aplikasi video *streaming* didapatkan sesuai dengan persamaan 2-65:

$$\begin{aligned} W_{VS \text{ eNodeB}} &= W_{frame \text{ S-GW}} - H_{GTP} - H_{UDP} - H_{IP} - H_{ethernet} - FCS \\ &= 2650 - [2 \times (8 + 8 + 40 + 14 + 4)] \\ &= 2502 \text{ byte} \end{aligned}$$

eNodeB menggunakan interface STM-1 (*Synchronous Transport Module-1*) dengan kecepatan 155,52 Mbps. Maka besarnya *delay* dekapsulasi didapatkan dengan menggunakan persamaan 2-66:

$$\begin{aligned} t_{D(eNodeB)} &= \frac{W_{VSeNodeB}}{C_{eNodeB}} \times 8 \\ &= \frac{2502}{155,52 \cdot 10^6 \text{ bps}} \times 8 \\ &= 1,287 \cdot 10^{-4} \text{ s} \end{aligned}$$

Pada layer PDCP (*Packet Data Convergence Protocol*), paket datagram IP video *streaming* dienkapsulasi dengan penambahan *header* sebesar 1 byte, yaitu *header* PDU. Banyaknya paket IP pada eNodeB dapat diperoleh dengan persamaan 2-67:

$$\begin{aligned} N_{datagram} &= \frac{W_{VSeNodeB}}{MTU} \\ &= \frac{2502 \text{ byte}}{1500 \text{ byte}} \\ &= 1,668 \end{aligned}$$

Terdapat 1 buah datagram IP berisi data 1500 byte dan 1 buah datagram IP berisi data sebesar (0,668 x 1500 byte = 1002 byte), sehingga terdapat 2 buah *frame* datagram IP. Kemudian pada layer PDCP, panjang *frame* ditambahkan dengan *header* PDCP sebesar 1 byte. Panjang *frame* PDCP dihitung sesuai dengan persamaan 2-68:

$$\begin{aligned} W_{frame \text{ PDCP}} &= W_{VS \text{ eNodeB}} + H_{PDCP} \\ &= 2502 + (2 \times 1) \\ &= 2503 \text{ byte} \end{aligned}$$

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 2-69:

$$\begin{aligned} N_{frameRLC} &= \frac{W_{framePDCP}}{40 \text{ byte}} \\ &= \frac{W_{framePDCP}}{40 \text{ byte}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{2503 \text{ byte}}{40 \text{ byte}} \\
 &= 62,575
 \end{aligned}$$

Terdapat 49 buah *frame* data berisi 40 *byte* dan 1 buah *frame* data berisi (0,575 x 40 *byte* = 23 *byte*), sehingga terdapat 2 buah *frame* data. 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 2-70:

$$\begin{aligned}
 W_{\text{frame RLC total}} &= N_{\text{frame RLC}} \times W_{\text{frame RLC}} \\
 &= 63 \times 42 \text{ byte} \\
 &= 2646 \text{ byte}
 \end{aligned}$$

Pada *layer* MAC, RLC disegmentasi menjadi MAC SDU (*Service Data Unit*) sebesar 42 *byte*. Jumlah *frame* SDU dihitung sesuai dengan persamaan 2-71:

$$\begin{aligned}
 N_{\text{frame MAC}} &= \frac{W_{\text{frame RLC total}}}{42 \text{ byte}} \\
 &= \frac{2646 \text{ byte}}{42 \text{ byte}} \\
 &= 63
 \end{aligned}$$

Sedangkan panjang *frame* MAC dihitung dengan menggunakan persamaan 2-72:

$$\begin{aligned}
 W_{\text{frame MAC}} &= H_{\text{MAC}} + 42 \text{ byte} \\
 &= 0,5 + 42 \\
 &= 42,5 \text{ byte}
 \end{aligned}$$

Panjang *frame* yang siap ditransmisikan menuju UE merupakan panjang *frame* MAC total, dihitung sesuai dengan persamaan 2-73:

$$\begin{aligned}
 W_{\text{frame eNodeB}} &= N_{\text{frame MAC}} \times W_{\text{frame MAC}} \\
 &= 63 \times 42,5 \\
 &= 2677,5 \text{ byte}
 \end{aligned}$$

Sehingga besar *delay* dekapsulasi yang terjadi pada eNodeB didapatkan dengan menggunakan persamaan 2-74:

$$t_{E(\text{eNodeB})} = \frac{W_{\text{frame eNodeB}}}{C_{\text{eNodeB}}} \times 8$$

$$= \frac{2677,5}{155,52 \cdot 10^6 \text{ bps}} \times 8$$

$$= 1,377 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

### ➤ UE (User Equipment)

Pada UE, paket data yang diterima dari eNodeB mengalami proses dekapsulasi. Proses dekapsulasi pada UE dihitung sesuai dengan persamaan 2-75:

$$W_{VS \text{ UE}} = W_{\text{frame eNode B}} - H_{\text{GTP}} - H_{\text{UDP}} - H_{\text{IP}} - H_{\text{PDCP}} - H_{\text{RLC}} - H_{\text{MAC}}$$

$$= 2502 - (6 \times 8) - (8 \times 8) - (8 \times 40) - (2 \times 1) - (2 \times 42) - (0,5 \times 42)$$

$$= 2138,5 \text{ byte}$$

Dengan mengasumsikan *data rate* maksimum sebesar 3,6 Mbps, maka besarnya *delay* dekapsulasi yang terjadi di UE didapatkan sesuai dengan persamaan 2-76:

$$t_{D(UE)} = \frac{W_{VSUE}}{C_{UE}} \times 8$$

$$= \frac{2138,5}{3,6 \cdot 10^6 \text{ bps}} \times 8$$

$$= 4,752 \times 10^{-3} \text{ s}$$

### ➤ Delay Proses dari Server ke UE pada Jaringan UMTS

Dengan menggunakan persamaan 2-11 sampai 2-13 didapatkan besarnya *delay* proses total video *streaming* pada jaringan LTE adalah:

$$t_{\text{Tot}} = t_{E(\text{server})} + t_{E(\text{GGSN})} + t_{E(\text{SGSN})} + t_{E(\text{RAN})}$$

$$= 2,1072 \cdot 10^{-5} + 2,12 \cdot 10^{-4} + 1,499 \cdot 10^{-4} + 1,523 \cdot 10^{-4}$$

$$= 5,3527 \cdot 10^{-4} \text{ s}$$

$$t_{\text{Dtot}} = t_{D(\text{GGSN})} + t_{D(\text{SGSN})} + t_{D(\text{RAN})} + t_{D(\text{UE})}$$

$$= 2,0016 \cdot 10^{-4} + 2,016 \cdot 10^{-4} + 1,2922 \cdot 10^{-4} + 5,246 \cdot 10^{-2}$$

$$= 5,299 \cdot 10^{-2} \text{ s}$$

$$t_{\text{proc}} = t_E + t_D$$

$$= 5,3527 \cdot 10^{-4} + 5,299 \cdot 10^{-2}$$

$$= 5,3525 \cdot 10^{-2} = 0,053525 \text{ s}$$

➤ **Delay Proses dari Server ke UE pada Jaringan LTE**

Dengan menggunakan persamaan 2-14 sampai 2-16 didapatkan besarnya *delay* proses total video *streaming* pada jaringan LTE adalah:

$$\begin{aligned}
 t_{\text{Etot}} &= t_{\text{E(server)}} + t_{\text{E(PDN-GW)}} + t_{\text{E(S-W)}} + t_{\text{E(eNodeB)}} \\
 &= 2,1072 \cdot 10^{-5} + 2,12 \cdot 10^{-4} + 2,12 \cdot 10^{-4} + 1,377 \cdot 10^{-4} \\
 &= 5,8277 \cdot 10^{-4} \text{ s} \\
 t_{\text{Dtot}} &= t_{\text{D(PDN-GW)}} + t_{\text{D(S-GW)}} + t_{\text{D(eNodeB)}} + t_{\text{D4(UE)}} \\
 &= 2,0016 \cdot 10^{-4} + 2,0016 \cdot 10^{-4} + 1,287 \cdot 10^{-4} + 4,752 \cdot 10^{-3} \\
 &= 5,281 \cdot 10^{-3} \text{ s} \\
 t_{\text{proc}} &= t_{\text{E}} + t_{\text{D}} \\
 &= 5,8277 \cdot 10^{-4} + 5,281 \cdot 10^{-3} \\
 &= 5,864 \cdot 10^{-3} = 0,005864 \text{ s}
 \end{aligned}$$

Dari hasil perhitungan dapat diketahui bahwa *delay* proses pada jaringan LTE lebih kecil dibandingkan *delay* proses pada jaringan UMTS. Hal ini disebabkan karena kecepatan transmisi data pada jaringan LTE lebih besar dari kecepatan transmisi data pada jaringan UMTS.

**4.3.1.2 Delay Transmisi**

Perhitungan *delay* transmisi pada jaringan LTE meliputi hubungan antara *server* dengan PDN-GW, PDN-GW dengan S-GW, S-GW dengan eNodeB, dan eNodeB dengan UE, serta server dengan GGSN, GGSN – SGSN (*Gn interface*), SGSN – RNC (*Iu interface*), RNC – Node B (*Iub interface*), dan Node B –UE (*Uu interface*), untuk jaringan UMTS.

➤ **Server - PDN-GW**

Hubungan antara Server dan PDN-GW menggunakan standar *interface Gigabit Ethernet* dengan kecepatan 1 Gbps. Sehingga nilai *delay* transmisi yang terjadi sesuai dengan persamaan 2-77:

$$\begin{aligned}
 t_{T1} &= \frac{W_{\text{frameserver}}}{C_{\text{ethernet}}} \times 8 \\
 &= \frac{2634}{10^9 \text{ bps}} \times 8 = 2,1072 \cdot 10^{-5} \text{ s}
 \end{aligned}$$

### ➤ PDN-GW – S-GW

Hubungan antara PDN-GW dan S-GW menggunakan standar *Fast Ethernet* dengan kecepatan 100 Mbps. Sehingga nilai *delay* transmisi yang terjadi sesuai dengan persamaan 2-77:

$$\begin{aligned} t_{T2} &= \frac{W_{framePDN-GW}}{C_{ethernet}} \times 8 \\ &= \frac{2650}{10^8} \times 8 \\ &= 2,12 \times 10^{-4} s \end{aligned}$$

### ➤ S-GW – eNodeB

Hubungan antara S-GW dan eNodeB menggunakan standar *Fast Ethernet* dengan kecepatan 100 Mbps. Sehingga nilai *delay* transmisi yang terjadi sesuai dengan persamaan 2-77:

$$\begin{aligned} t_{T3} &= \frac{W_{frameS-GW}}{C_{ethernet}} \times 8 \\ &= \frac{2650}{10^8 bps} \times 8 \\ &= 2,12 \times 10^{-4} s \end{aligned}$$

### ➤ 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 3,6 Mbps. Jumlah slot ditentukan oleh *chip rate* TDD-LTE yaitu sebesar 3,84 Mcps. *Chip rate* sebesar 3,84 Mcps selanjutnya dibagi menjadi radio *frame* 10 ms. Satu slot terdiri dari 2560 *chip* dan banyaknya slot dapat dihitung menggunakan persamaan

$$n = \frac{(cr \times rf)}{2560 \text{ chip}},$$

dengan:

$n$  = banyaknya slot

$cr$  = *chip rate*

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

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

$$\begin{aligned} n &= \frac{(cr \times rf)}{2560 \text{ chip}} \\ &= \frac{3,84.10^6 \text{ cps} \times 10.10^{-3}}{2560 \text{ chip}} \\ &= 15 \end{aligned}$$

Sehingga nilai *delay* transmisi yang terjadi sesuai dengan persamaan 2-77:

$$\begin{aligned} t_{T4} &= \frac{W_{frameNodeB}}{n \times C_{eNodeB}} \times 8 \\ &= \frac{2677,5}{15 \times (155,52.10^6 \text{ bps})} \times 8 \\ &= 9,1821 \times 10^{-6} \text{ s} \end{aligned}$$

#### ➤ **Server**

Hubungan antara Server dan GGSN menggunakan standar *interface Gigabit Ethernet* dengan kecepatan 1 Gbps. Sehingga nilai *delay* transmisi yang terjadi sesuai dengan persamaan 2-77:

$$\begin{aligned} t_{T1} &= \frac{W_{frameserver}}{C_{ethernet}} \times 8 \\ &= \frac{2634}{10^9 \text{ bps}} \times 8 \\ &= 2,1072.10^{-5} \text{ s} \end{aligned}$$

#### ➤ **GGSN – SGSN**

Hubungan antara GGSN dan SGSN menggunakan *Fast Ethernet* dengan kecepatan transmisi data sebesar 100 Mbps sesuai standard IEEE 802.3. Sehingga nilai *delay* transmisi yang terjadi sesuai dengan persamaan 2-77:

$$\begin{aligned} t_{T2} &= \frac{W_{frameGGSN}}{C_{ethernet}} \times 8 \\ &= \frac{2650}{10^8 \text{ bps}} \times 8 \\ &= 2,12.10^{-4} \text{ s} \end{aligned}$$

### ➤ SGSN – RNC

Hubungan antara SGSN dan RAN menggunakan *interface* sistem tranmisi digital STM-1 yang memberikan kecepatan data sebesar 155,52 Mbps sesuai standard ITU-T G.703. Sehingga nilai *delay* transmisi yang terjadi sesuai dengan persamaan 2-77:

$$\begin{aligned} t_{T3} &= \frac{W_{frameSGSN}}{C_{luInterface}} \times 8 \\ &= \frac{2915}{155.52 \times 10^6 \text{ bps}} \times 8 \\ &= 1,4994 \cdot 10^{-4} \text{ s} \end{aligned}$$

### ➤ RNC – NodeB

Hubungan antara RNC dan *NodeB* menggunakan *interface* sistem tranmisi digital STM-1 yang memberikan kecepatan data sebesar 155,52 Mbps sesuai standard ITU-T G.703. Sehingga nilai *delay* transmisi yang terjadi sesuai dengan persamaan 2-77:

$$\begin{aligned} t_{T4} &= \frac{W_{frameMAC}}{C_{lubInterface}} \times 8 \\ &= \frac{2961}{155.52 \times 10^6 \text{ bps}} \times 8 \\ &= 1,523 \cdot 10^{-4} \text{ s} \end{aligned}$$

### ➤ NodeB – UE

*Delay* transmisi yang terjadi antara *Node B* dan UE bergantung pada *data rate* UE serta jumlah slot. Terminal pengguna diasumsikan memiliki *data rate* maksimum sebesar 384 kbps. Jumlah slot ditentukan oleh *chip rate* UMTS yaitu sebesar 3,84 Mcps. *Chip rate* sebesar 3,84 Mcps selanjutnya dibagi menjadi radio *frame* 2 ms. Satu slot terdiri dari 2560 *chip* sehingga banyaknya slot adalah:

$$\begin{aligned} n &= \frac{(cr \times rf)}{2560 \text{ chip}} \\ &= \frac{3,84 \cdot 10^6 \text{ cps} \times 2 \cdot 10^{-3} \text{ s}}{2560 \text{ chip}} = \frac{7680 \text{ chip}}{2560 \text{ chip}} = 3 \text{ slot} \end{aligned}$$

Jumlah *slot* pada *air interface* UMTS adalah sebanyak 3 slot. Sehingga nilai *delay* transmisi yang terjadi sesuai dengan persamaan 2-77:

$$\begin{aligned}
 t_{T5} &= \frac{W_{frameMAC}}{n \times C_{UE}} \times 8 \\
 &= \frac{2961}{3 \times (384 \times 10^3) bps} \times 8 \\
 &= 2,056.10^{-2} s
 \end{aligned}$$

#### ➤ Delay Transmisi Total pada Jaringan UMTS

Delay transmisi total pada jaringan UMTS merupakan nilai total dari *delay* transmisi pada tiap *interface*, sehingga ditentukan berdasarkan persamaan 2-78:

$$\begin{aligned}
 t_{Tot1} &= t_{T1} + t_{T2} + t_{T3} + t_{T4} + t_{T5} \\
 &= 2,1072.10^{-5} + 2,12.10^{-4} + 1,4994.10^{-4} + 1,523.10^{-4} + 2,056.10^{-2} \\
 &= 2,1095.10^{-2} s
 \end{aligned}$$

#### ➤ Delay Transmisi Total pada Jaringan LTE

Delay transmisi total pada jaringan LTE merupakan nilai total dari *delay* transmisi pada tiap *interface*, sehingga ditentukan berdasarkan persamaan 2-79:

$$\begin{aligned}
 t_{Tot1} &= t_{T1} + t_{T2} + t_{T3} + t_{T4} \\
 &= 2,1072.10^{-5} + 2,12.10^{-4} + 2,12.10^{-4} + 9,1821.10^{-6} \\
 &= 4,5425.10^{-4} s
 \end{aligned}$$

#### 4.3.1.3 Delay Propagasi

Analisis perhitungan *delay* propagasi pada jaringan LTE meliputi *Server* – PDN-GW – S-GW – eNodeB – UE, sedangkan pada jaringan UMTS *Server* – GGSN – SGSN – RNC – Node B – UE dimana propagasi antara *Server* hingga eNodeB menggunakan media *fiber optic*, sedangkan propagasi antara NodeB dan eNodeB dengan UE menggunakan media udara. Jarak antar *node* pada jaringan LTE yang digunakan dalam analisis perhitungan *delay* propagasi merupakan asumsi dari penulis.

#### ➤ Delay Propagasi dari Server ke PDN-GW

Hubungan antara *Server* ke PDN-GW menggunakan *fiber optic* dengan jarak 5000m. Nilai *delay* propagasi antara *Server* dengan PDN-GW sesuai dengan persamaan 2-80:

$$t_{p1} = \frac{N_{frameethernet} \times R}{v}$$

$$= \frac{2 \times 5.10^3}{3.10^8}$$

$$= 3,3333.10^{-5} \text{ s}$$

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

Hubungan antara PDN-GW ke S-GW menggunakan *fiber optic* dengan jarak 4000 m. Nilai *delay* propagasi antara PDN-GW dengan S-GW sesuai dengan persamaan 2-80:

$$t_{p2} = \frac{N_{framePDN-GW} \times R}{v}$$

$$= \frac{2 \times 4.10^3}{3.10^8}$$

$$= 2,666.10^{-5} \text{ s}$$

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

Hubungan antara S-GW ke eNodeB menggunakan *fiber optic* dengan jarak 3000 m. Nilai *delay* propagasi antara S-GW dengan eNodeB sesuai dengan persamaan 2-80:

$$t_{p3} = \frac{N_{frameS-GW} \times R}{v}$$

$$= \frac{2 \times 3.10^3}{3.10^8}$$

$$= 2.10^{-5} \text{ s}$$

➤ **Delay Propagasi dari eNodeB ke UE**

Hubungan antara eNodeB ke UE menggunakan media udara dengan jarak 1000 m. Nilai *delay* propagasi antara eNodeB dengan UE sesuai dengan persamaan 2-80:

$$t_{p41} = \frac{N_{frameeNodeB} \times R}{v}$$

$$= \frac{63.10^3}{3.10^8}$$

$$= 2,1.10^{-4} \text{ s}$$

➤ **Delay Propagasi dari Server ke GGSN**

Hubungan antara Server ke GGSN menggunakan *fiber optic* dengan jarak 5000 m. Nilai *delay* propagasi antara Server dengan GGSN sesuai dengan persamaan 2-80:

$$t_{server} = \frac{N_{frameEthernet} \times R}{v}$$

$$= \frac{2 \times 5.10^3}{2.10^8}$$

$$= 5.10^{-5} s$$

➤ **Delay Propagasi dari GGSN ke SGSN**

Hubungan antara GGSN ke SGSN menggunakan *fiber optic* dengan jarak 4000 m.

Nilai *delay* propagasi antara GGSN dengan SGSN sesuai dengan persamaan 2-80:

$$t_{GGSN} = \frac{N_{frameGGSN} \times R}{v}$$

$$= \frac{2 \times 4.10^3}{2.10^8}$$

$$= 4.10^{-5} s$$

➤ **Delay Propagasi dari SGSN ke RNC**

Hubungan antara SGSN ke RNC menggunakan *fiber optic* dengan jarak 3000 m.

Nilai *delay* propagasi antara SGSN dengan RNC sesuai dengan persamaan 2-80:

$$t_{SGSN} = \frac{N_{frameATM} \times R}{v}$$

$$= \frac{55 \times 3.10^3}{2.10^8}$$

$$= 8,25.10^{-4} s$$

➤ **Delay Propagasi dari RNC ke NodeB**

Hubungan antara RNC ke *NodeB* menggunakan *fiber optic* dengan jarak 2000 m.

Nilai *delay* propagasi antara RNC dengan *NodeB* sesuai dengan persamaan 2-80:

$$t_{RNC} = \frac{N_{frameMAC} \times R}{v}$$

$$= \frac{63 \times 2.10^3}{2.10^8}$$

$$= 6,3.10^{-4} s$$

➤ **Delay Propagasi dari NodeB ke UE**

Hubungan antara *NodeB* ke UE menggunakan media udara dengan jarak 1000 m.

Nilai *delay* propagasi antara *NodeB* dengan UE sesuai dengan persamaan 2-80:

$$t_{pNodeB-UE} = \frac{N_{frameMAC} \times R}{v}$$

$$= \frac{63.10^3}{3.10^8}$$

$$= 2,1.10^{-4} s$$

### ➤ Delay Propagasi Total pada Jaringan UMTS

Nilai *delay* propagasi total pada Jaringan UMTS dapat ditentukan dengan persamaan 2-81:

$$t_p \text{ UMTS} = t_{p(\text{Server-GGSN})} + t_{p(\text{GGSN-SGSN})} + t_{p(\text{SGSN-RNC})} + t_{p(\text{RNC-NodeB})} + t_{p(\text{NodeB-UE})}$$

$$= 5.10^{-5} + 4.10^{-5} + 8,25.10^{-4} + 6,3.10^{-4} + 2,1.10^{-4}$$

$$= 1,76 \times 10^{-3} s$$

### ➤ Delay Propagasi Total pada Jaringan LTE

Nilai *delay* Propagasi total pada Jaringan LTE dapat ditentukan dengan persamaan 2-82 berikut:

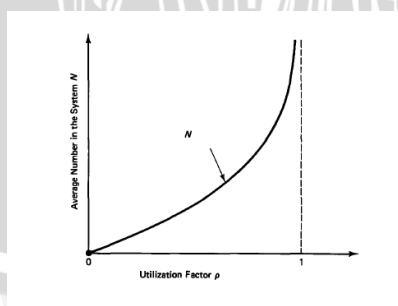
$$t_p \text{ LTE} = t_{p(\text{Server-PDN.GW})} + t_{p(\text{PDN.GW-S.GW})} + t_{p(\text{S.GW-eNodeB})} + t_{p(\text{eNodeB-UE})}$$

$$= 3,3333.10^{-5} + 2,666.10^{-5} + 2,10^{-5} + 2,1.10^{-4}$$

$$= 2,8 \times 10^{-4} s$$

#### 4.3.1.4 Delay Antrian

*Delay* antrian terjadi pada PDN-GW, S-GW, dan eNodeB dengan menggunakan model antrian M/M/1. Dalam analisis perhitungan *delay* antrian ini diasumsikan bahwa besar faktor utilisasi ( $\rho$ ) berubah-ubah antara nilai 0,1 sampai dengan 0,9. Faktor utilisasi yang berubah-ubah mengindikasikan banyaknya *user* yang berada dalam antrian (Dimitri Bertsekas and Robert Gallager, 1987: 129) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.4



**Gambar 4.4** Hubungan antara Faktor Utilisasi terhadap Banyaknya User dalam Sistem Antrian  
(Sumber: Dimitri Bertsekas and Robert Gallager, 1987: 129)

➤ **Delay Antrian pada PDN-GW**

Pada PDN-GW digunakan standar *Fast Ethernet* dengan kecepatan 100 Mbps dengan panjang data 2650 *byte*. Besar laju pelayanan paket data didapatkan sesuai dengan persamaan 2-84:

$$\begin{aligned}\mu_{PDN-GW} &= \frac{C_{PDN-GW}}{L} \\ &= \frac{10^8}{2650 \times 8} \\ &= 4717 \text{ paket/s}\end{aligned}$$

Laju kedatangan paket ( $\lambda$ ) sesuai dengan persamaan 2-85:

$$\begin{aligned}\lambda_{PDN-GW} &= \mu_{PDN-GW} \times \rho_{PDN-GW} \\ &= 4717 \times 0,1 = 471,7 \text{ paket/s}\end{aligned}$$

Delay antrian dapat ditentukan sesuai dengan persamaan 2-86:

$$\begin{aligned}t_{w1} &= \frac{\lambda_{PDN-GW}}{\mu_{PDN-GW} (\mu_{PDN-GW} - \lambda_{PDN-GW})} + \frac{1}{\mu_{PDN-GW}} \\ &= \frac{471,7}{4717(4717 - 471,7)} + \frac{1}{4717} \\ &= 2 \times 10^{-4} \text{ s}\end{aligned}$$

Hasil analisis *delay* antrian yang terjadi pada PDN-GW terhadap perubahan faktor utilisasi ditunjukkan pada tabel 4.1

**Tabel 4.1** Hasil Analisis *Delay* Antrian pada PDN-GW dengan Perubahan Faktor Utilisasi

| No. | Faktor Utilisasi | Delay Antrian pada PDN-GW (s) |
|-----|------------------|-------------------------------|
| 1.  | 0,1              | $2.10^{-4}$                   |
| 2.  | 0,2              | $3.10^{-4}$                   |
| 3.  | 0,3              | $3.10^{-4}$                   |
| 4.  | 0,4              | $4.10^{-4}$                   |
| 5.  | 0,5              | $4.10^{-4}$                   |
| 6.  | 0,6              | $5.10^{-4}$                   |
| 7.  | 0,7              | $7.10^{-4}$                   |
| 8.  | 0,8              | $11.10^{-4}$                  |
| 9.  | 0,9              | $21.10^{-4}$                  |

(Sumber: Hasil Perhitungan)

### ➤ Delay Antrian pada S-GW

Pada S-GW digunakan standar *Fast Ethernet* dengan kecepatan 100 Mbps dengan panjang data 2650 *byte*. Besar laju pelayanan paket data didapatkan sesuai dengan persamaan 2-84:

$$\begin{aligned}\mu_{S-GW} &= \frac{C_{S-GW}}{L} \\ &= \frac{10^8}{2650 \times 8} \\ &= 4717 \text{ paket/s}\end{aligned}$$

Laju kedatangan paket ( $\lambda$ ) sesuai dengan persamaan 2-85:

$$\begin{aligned}\lambda_{S-GW} &= \mu_{S-GW} \times \rho_{S-GW} \\ &= 4717 \times 0,1 = 471,7 \text{ paket/s}\end{aligned}$$

Delay antrian dapat ditentukan sesuai dengan persamaan 2-86:

$$\begin{aligned}t_{w2} &= \frac{\lambda_{S-GW}}{\mu_{S-GW}(\mu_{S-GW} - \lambda_{S-GW})} + \frac{1}{\mu_{S-GW}} \\ &= \frac{471,7}{4717(4717 - 471,7)} + \frac{1}{4717} \\ &= 2 \times 10^{-4} \text{ s}\end{aligned}$$

Hasil analisis *delay* antrian yang terjadi pada S-GW terhadap perubahan faktor utilisasi ditunjukkan pada tabel 4.2

**Tabel 4.2** Hasil Analisis *Delay* Antrian pada S-GW dengan Perubahan Faktor Utilisasi

| No. | Faktor Utilisasi | Delay Antrian pada S-GW (s) |
|-----|------------------|-----------------------------|
| 1.  | 0,1              | $2.10^{-4}$                 |
| 2.  | 0,2              | $3.10^{-4}$                 |
| 3.  | 0,3              | $3.10^{-4}$                 |
| 4.  | 0,4              | $4.10^{-4}$                 |
| 5.  | 0,5              | $4.10^{-4}$                 |
| 6.  | 0,6              | $5.10^{-4}$                 |
| 7.  | 0,7              | $7.10^{-4}$                 |
| 8.  | 0,8              | $11.10^{-4}$                |
| 9.  | 0,9              | $21.10^{-4}$                |

(Sumber: Hasil Perhitungan)

➤ **Delay Antrian pada eNodeB**

Pada eNodeB *interface* sistem transmisi STM-1 yang memberikan kecepatan data sebesar 155,52 Mbps dengan panjang data 2040 *byte*. Besar laju pelayanan paket data didapatkan sesuai dengan persamaan 2-84:

$$\begin{aligned}\mu_{eNodeB} &= \frac{C_{eNodeB}}{L} \\ &= \frac{155,52 \cdot 10^6}{2040 \times 8} \\ &= 9529,4 \text{ paket/s}\end{aligned}$$

Laju kedatangan paket ( $\lambda$ ) sesuai dengan persamaan 2-85:

$$\begin{aligned}\lambda_{eNodeB} &= \mu_{eNodeB} \times \rho_{eNodeB} \\ &= 9529,4 \times 0,1 = 952,94 \text{ paket/s}\end{aligned}$$

Delay antrian dapat ditentukan sesuai dengan persamaan 2-86:

$$\begin{aligned}t_{w3} &= \frac{\lambda_{eNodeB}}{\mu_{eNodeB} (\mu_{eNodeB} - \lambda_{eNodeB})} + \frac{1}{\mu_{eNodeB}} \\ &= \frac{952,94}{9529,4(9529,4 - 952,94)} + \frac{1}{9529,4} \\ &= 1 \times 10^{-4} \text{ s}\end{aligned}$$

Hasil analisis *delay* antrian yang terjadi pada eNodeB terhadap perubahan faktor utilisasi ditunjukkan pada tabel 4.3

**Tabel 4.3** Hasil Analisis *Delay* Antrian pada eNodeB dengan Perubahan Faktor Utilisasi

| No. | Faktor Utilisasi | Delay Antrian pada eNodeB (s) |
|-----|------------------|-------------------------------|
| 1.  | 0,1              | $1 \cdot 10^{-4}$             |
| 2.  | 0,2              | $1 \cdot 10^{-4}$             |
| 3.  | 0,3              | $1 \cdot 10^{-4}$             |
| 4.  | 0,4              | $2 \cdot 10^{-4}$             |
| 5.  | 0,5              | $2 \cdot 10^{-4}$             |
| 6.  | 0,6              | $3 \cdot 10^{-4}$             |
| 7.  | 0,7              | $5 \cdot 10^{-4}$             |
| 8.  | 0,8              | $5 \cdot 10^{-4}$             |
| 9.  | 0,9              | $10 \cdot 10^{-4}$            |

(Sumber: Hasil Perhitungan)

➤ **Delay Antrian pada GGSN**

Pada GGSN digunakan standar *Fast Ethernet* dengan kecepatan 100 Mbps dengan panjang data 2650 *byte*. Besar laju pelayanan paket data didapatkan sesuai dengan persamaan 2-84:

$$\begin{aligned}\mu_{GGSN} &= \frac{C_{GGSN}}{L} \\ &= \frac{10^8}{2650 \times 8} \\ &= 4717 \text{ paket/s}\end{aligned}$$

Laju kedatangan paket ( $\lambda$ ) sesuai dengan persamaan 2-85:

$$\begin{aligned}\lambda_{GGSN} &= \mu_{GGSN} \times \rho_{GGSN} \\ &= 4717 \times 0,1 = 471,7 \text{ paket/s}\end{aligned}$$

Delay antrian dapat ditentukan sesuai dengan persamaan 2-86:

$$\begin{aligned}t_{w1} &= \frac{\lambda_{GGSN}}{\mu_{GGSN} (\mu_{GGSN} - \lambda_{GGSN})} + \frac{1}{\mu_{GGSN}} \\ &= \frac{471,7}{4717(4717 - 471,7)} + \frac{1}{4717} \\ &= 2 \times 10^{-4} \text{ s}\end{aligned}$$

Hasil analisis *delay* antrian yang terjadi pada GGSN terhadap perubahan faktor utilisasi ditunjukkan pada tabel 4.4

**Tabel 4.4** Hasil Analisis *Delay* Antrian pada GGSN dengan Perubahan Faktor Utilisasi

| No. | Faktor Utilisasi | Delay Antrian pada GGSN (s) |
|-----|------------------|-----------------------------|
| 1.  | 0,1              | $2.10^{-4}$                 |
| 2.  | 0,2              | $3.10^{-4}$                 |
| 3.  | 0,3              | $3.10^{-4}$                 |
| 4.  | 0,4              | $4.10^{-4}$                 |
| 5.  | 0,5              | $4.10^{-4}$                 |
| 6.  | 0,6              | $5.10^{-4}$                 |
| 7.  | 0,7              | $7.10^{-4}$                 |
| 8.  | 0,8              | $11.10^{-4}$                |
| 9.  | 0,9              | $21.10^{-4}$                |

(Sumber: Hasil Perhitungan)

### ➤ Delay Antrian pada SGSN

Pada SGSN digunakan standar *Fast Ethernet* dengan kecepatan 100 Mbps dengan panjang data 2915 *byte*. Besar laju pelayanan paket data didapatkan sesuai dengan persamaan 2-84:

$$\begin{aligned}\mu_{SGSN} &= \frac{C_{SGSN}}{L} \\ &= \frac{10^8}{2915 \times 8} \\ &= 4288 \text{ paket/s}\end{aligned}$$

Laju kedatangan paket ( $\lambda$ ) sesuai dengan persamaan 2-85:

$$\begin{aligned}\lambda_{SGSN} &= \mu_{SGSN} \times \rho_{SGSN} \\ &= 4288 \times 0,1 = 428,8 \text{ paket/s}\end{aligned}$$

Delay antrian dapat ditentukan sesuai dengan persamaan 2-86:

$$\begin{aligned}t_{w2} &= \frac{\lambda_{SGSN}}{\mu_{SGSN} (\mu_{SGSN} - \lambda_{SGSN})} + \frac{1}{\mu_{SGSN}} \\ &= \frac{428,8}{4288(4288 - 428,8)} + \frac{1}{4288} \\ &= 3 \times 10^{-4} \text{ s}\end{aligned}$$

Hasil analisis *delay* antrian yang terjadi pada SGSN terhadap perubahan faktor utilisasi ditunjukkan pada tabel 4.5

**Tabel 4.5** Hasil Analisis Delay Antrian pada SGSN dengan Perubahan Faktor Utilisasi

| No. | Faktor Utilisasi | Delay Antrian pada SGSN (s) |
|-----|------------------|-----------------------------|
| 1.  | 0,1              | $3.10^{-4}$                 |
| 2.  | 0,2              | $3.10^{-4}$                 |
| 3.  | 0,3              | $3.10^{-4}$                 |
| 4.  | 0,4              | $4.10^{-4}$                 |
| 5.  | 0,5              | $5.10^{-4}$                 |
| 6.  | 0,6              | $6.10^{-4}$                 |
| 7.  | 0,7              | $8.10^{-4}$                 |
| 8.  | 0,8              | $12.10^{-4}$                |
| 9.  | 0,9              | $23.10^{-4}$                |

(Sumber: Hasil Perhitungan)

➤ **Delay Antrian pada RNC**

Pada RNC digunakan standar *Fast Ethernet* dengan kecepatan 100 Mbps dengan panjang data 2961 *byte*. Besar laju pelayanan paket data didapatkan sesuai dengan persamaan 2-84:

$$\begin{aligned}\mu_{RNC} &= \frac{C_{RNC}}{L} \\ &= \frac{10^8}{2961 \times 8} \\ &= 42215 \text{ paket/s}\end{aligned}$$

Laju kedatangan paket ( $\lambda$ ) sesuai dengan persamaan 2-85:

$$\begin{aligned}\lambda_{RNC} &= \mu_{RNC} \times \rho_{RNC} \\ &= 42215 \times 0,1 = 4221,5 \text{ paket/s}\end{aligned}$$

Delay antrian dapat ditentukan sesuai dengan persamaan 2-86:

$$\begin{aligned}t_{w3} &= \frac{\lambda_{RNC}}{\mu_{RNC}(\mu_{RNC} - \lambda_{RNC})} + \frac{1}{\mu_{RNC}} \\ &= \frac{4221,5}{4221,5(4221,5 - 4221,5)} + \frac{1}{4221,5} \\ &= 3 \times 10^{-4} \text{ s}\end{aligned}$$

Hasil analisis *delay* antrian yang terjadi pada RNC terhadap perubahan faktor utilisasi ditunjukkan pada tabel 4.6

**Tabel 4.6** Hasil Analisis *Delay* Antrian pada RNC dengan Perubahan Faktor Utilisasi

| No. | Faktor Utilisasi | Delay Antrian pada RNC (s) |
|-----|------------------|----------------------------|
| 1.  | 0,1              | $3.10^{-4}$                |
| 2.  | 0,2              | $3.10^{-4}$                |
| 3.  | 0,3              | $3.10^{-4}$                |
| 4.  | 0,4              | $4.10^{-4}$                |
| 5.  | 0,5              | $5.10^{-4}$                |
| 6.  | 0,6              | $6.10^{-4}$                |
| 7.  | 0,7              | $8.10^{-4}$                |
| 8.  | 0,8              | $12.10^{-4}$               |
| 9.  | 0,9              | $24.10^{-4}$               |

(Sumber: Hasil Perhitungan)

### ➤ Delay Antrian pada NodeB

Pada NodeB *interface* sistem transmisi STM-1 yang memberikan kecepatan data sebesar 155,52 Mbps dengan panjang data 2961 *byte*. Besar laju pelayanan paket data didapatkan sesuai dengan persamaan 2-84:

$$\begin{aligned}\mu_{eNodeB} &= \frac{C_{eNodeB}}{L} \\ &= \frac{155,52 \cdot 10^6}{2961 \times 8} \\ &= 6565 \text{ paket/s}\end{aligned}$$

Laju kedatangan paket ( $\lambda$ ) sesuai dengan persamaan 2-85:

$$\begin{aligned}\lambda_{eNodeB} &= \mu_{eNodeB} \times \rho_{eNodeB} \\ &= 6565 \times 0,1 = 656,5 \text{ paket/s}\end{aligned}$$

Delay antrian dapat ditentukan sesuai dengan persamaan 2-86:

$$\begin{aligned}t_{w4} &= \frac{\lambda_{eNodeB}}{\mu_{eNodeB}(\mu_{eNodeB} - \lambda_{eNodeB})} + \frac{1}{\mu_{eNodeB}} \\ &= \frac{656,5}{6565(6565 - 656,5)} + \frac{1}{6565} \\ &= 2 \times 10^{-4} \text{ s}\end{aligned}$$

Hasil analisis *delay* antrian yang terjadi pada NodeB terhadap perubahan faktor utilisasi ditunjukkan pada tabel 4.7

**Tabel 4.7** Hasil Analisis Delay Antrian pada NodeB dengan Perubahan Faktor Utilisasi

| No. | Faktor Utilisasi | Delay Antrian pada NodeB (s) |
|-----|------------------|------------------------------|
| 1.  | 0,1              | $2 \cdot 10^{-4}$            |
| 2.  | 0,2              | $2 \cdot 10^{-4}$            |
| 3.  | 0,3              | $2 \cdot 10^{-4}$            |
| 4.  | 0,4              | $3 \cdot 10^{-4}$            |
| 5.  | 0,5              | $3 \cdot 10^{-4}$            |
| 6.  | 0,6              | $4 \cdot 10^{-4}$            |
| 7.  | 0,7              | $5 \cdot 10^{-4}$            |
| 8.  | 0,8              | $8 \cdot 10^{-4}$            |
| 9.  | 0,9              | $15 \cdot 10^{-4}$           |

(Sumber: Hasil Perhitungan)

➤ **Delay Antrian Total pada jaringan LTE**

Delay antrian total yang terjadi pada jaringan LTE dengan faktor utilisasi 0,1 sesuai dengan persamaan 2-87 adalah

$$\begin{aligned} t_{w \text{ tot}} &= t_{w1} + t_{w2} + t_{w3} \\ &= 2.10^{-4} + 2.10^{-4} + 1.10^{-4} \\ &= 5.10^{-4} \text{ s} \end{aligned}$$

Delay antrian total yang terjadi pada jaringan LTE dengan faktor utilisasi 0,1 sampai 0,9 sesuai dengan Tabel 4.8:

**Tabel 4.8** Hasil Analisis Delay Antrian total pada jaringan LTE dengan Perubahan Faktor Utilisasi

| No. | Faktor Utilisasi | Delay Antrian pada PDN-GW (s) | Delay Antrian pada S-GW (s) | Delay Antrian pada eNodeB (s) | Delay Antrian Total (s) |
|-----|------------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| 1.  | 0,1              | $2.10^{-4}$                   | $2.10^{-4}$                 | $1.10^{-4}$                   | 0,0005                  |
| 2.  | 0,2              | $3.10^{-4}$                   | $3.10^{-4}$                 | $1.10^{-4}$                   | 0,0007                  |
| 3.  | 0,3              | $3.10^{-4}$                   | $3.10^{-4}$                 | $1.10^{-4}$                   | 0,0007                  |
| 4.  | 0,4              | $4.10^{-4}$                   | $4.10^{-4}$                 | $2.10^{-4}$                   | 0,0010                  |
| 5.  | 0,5              | $4.10^{-4}$                   | $4.10^{-4}$                 | $2.10^{-4}$                   | 0,0010                  |
| 6.  | 0,6              | $5.10^{-4}$                   | $5.10^{-4}$                 | $3.10^{-4}$                   | 0,0013                  |
| 7.  | 0,7              | $7.10^{-4}$                   | $7.10^{-4}$                 | $5.10^{-4}$                   | 0,0017                  |
| 8.  | 0,8              | $11.10^{-4}$                  | $11.10^{-4}$                | $5.10^{-4}$                   | 0,0029                  |
| 9.  | 0,9              | $21.10^{-4}$                  | $21.10^{-4}$                | $10.10^{-4}$                  | 0,0052                  |

(Sumber: Hasil Perhitungan)

➤ **Delay Antrian Total pada jaringan UMTS**

Delay antrian total yang terjadi pada jaringan UMTS dengan faktor utilisasi 0,1 sesuai dengan persamaan 2-88 adalah

$$\begin{aligned} t_{w \text{ tot}} &= t_{w1} + t_{w2} + t_{w3} + t_{w4} \\ &= 2.10^{-4} + 3.10^{-4} + 3.10^{-4} + 2.10^{-4} \\ &= 10.10^{-4} \text{ s} \end{aligned}$$

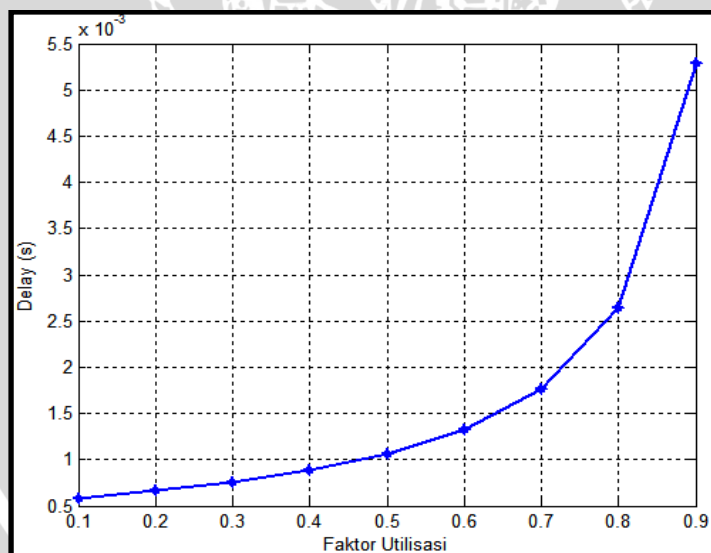
Delay antrian total yang terjadi pada jaringan UMTS dengan faktor utilisasi 0,1 sampai 0,9 sesuai dengan Tabel 4.9:

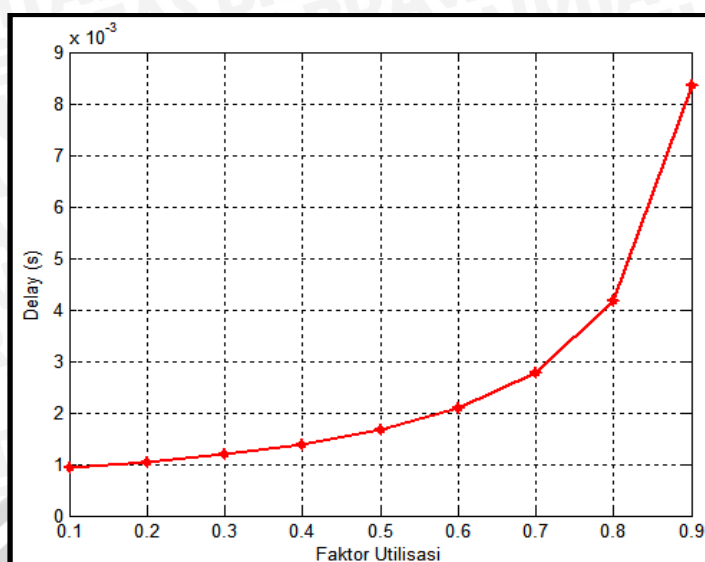
**Tabel 4.9** Hasil Analisis *Delay* Antrian total pada jaringan UMTS dengan Perubahan Faktor Utilisasi

| No. | Faktor Utilisasi | <i>Delay</i> Antrian pada GGSN (s) | <i>Delay</i> Antrian pada SGSN (s) | <i>Delay</i> Antrian pada RNC (s) | <i>Delay</i> Antrian pada NodeB (s) | <i>Delay</i> Antrian Total (s) |
|-----|------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| 1.  | 0,1              | $2.10^{-4}$                        | $3.10^{-4}$                        | $3.10^{-4}$                       | $2.10^{-4}$                         | 0,0010                         |
| 2.  | 0,2              | $3.10^{-4}$                        | $3.10^{-4}$                        | $3.10^{-4}$                       | $2.10^{-4}$                         | 0,0011                         |
| 3.  | 0,3              | $3.10^{-4}$                        | $3.10^{-4}$                        | $3.10^{-4}$                       | $2.10^{-4}$                         | 0,0011                         |
| 4.  | 0,4              | $4.10^{-4}$                        | $4.10^{-4}$                        | $4.10^{-4}$                       | $3.10^{-4}$                         | 0,0015                         |
| 5.  | 0,5              | $4.10^{-4}$                        | $5.10^{-4}$                        | $5.10^{-4}$                       | $3.10^{-4}$                         | 0,0017                         |
| 6.  | 0,6              | $5.10^{-4}$                        | $6.10^{-4}$                        | $6.10^{-4}$                       | $4.10^{-4}$                         | 0,0021                         |
| 7.  | 0,7              | $7.10^{-4}$                        | $8.10^{-4}$                        | $8.10^{-4}$                       | $5.10^{-4}$                         | 0,0028                         |
| 8.  | 0,8              | $11.10^{-4}$                       | $12.10^{-4}$                       | $12.10^{-4}$                      | $8.10^{-4}$                         | 0,0043                         |
| 9.  | 0,9              | $21.10^{-4}$                       | $23.10^{-4}$                       | $24.10^{-4}$                      | $15.10^{-4}$                        | 0,0083                         |

(Sumber: Hasil Perhitungan)

Dari Tabel 4.8 dan 4.9 di atas maka dapat dibuat grafik *delay* antrian total terhadap faktor utilisasi, pada jaringan UMTS dan LTE sebagai berikut:

**Gambar 4.5** Grafik Hubungan *Delay* Antrian Total Jaringan LTE terhadap Faktor Utilisasi  
Sumber: Analisis, 2012



**Gambar 4.6** Grafik Hubungan *Delay* Antrian Total Jaringan UMTS terhadap Faktor Utilisasi  
**Sumber:** Analisis, 2012

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan baik melalui matematis maupun grafis, maka dapat dijelaskan bahwa:

- Semakin bertambahnya faktor utilisasi, maka nilai *delay* antrian yang terjadi semakin besar. Hal ini disebabkan semakin besar faktor utilisasi, jumlah rata-rata pengguna di antrian semakin banyak, sehingga *delay* yang terjadi semakin besar.
- *Delay* antrian terbesar terdapat pada faktor utilisasi 0,9 pada jaringan UMTS, yaitu sebesar 0,0083 s. Sedangkan nilai *delay* antrian terkecil dicapai saat faktor utilisasi 0,1 terdapat pada jaringan LTE, yaitu sebesar 0,0005 s.

#### 4.3.1.5 *Delay* Total

Dari hasil perhitungan *delay* proses (enkapsulasi/dekapsulasi), *delay* transmisi, *delay* propagasi, dan *delay* antrian, maka dapat dihitung *delay end-to-end* pada jaringan LTE maupun jaringan UMTS.

##### ➤ *Delay* Total pada Jaringan LTE

Besar *delay end-to-end* pada jaringan LTE dengan panjang paket data 2502 *byte*, dan faktor utilisasi 0,1 dapat diperoleh dengan persamaan 2-8 berikut:

$$\begin{aligned}
 t_{net\text{ LTE}} &= t_{proc\text{ LTE}} + t_{T\text{ LTE}} + t_{P\text{ LTE}} + t_{W\text{ LTE}} \\
 &= 5,864 \cdot 10^{-3} + 4,5425 \cdot 10^{-4} + 2,8 \cdot 10^{-4} + 5 \cdot 10^{-4} = 0,0072\text{ s}
 \end{aligned}$$

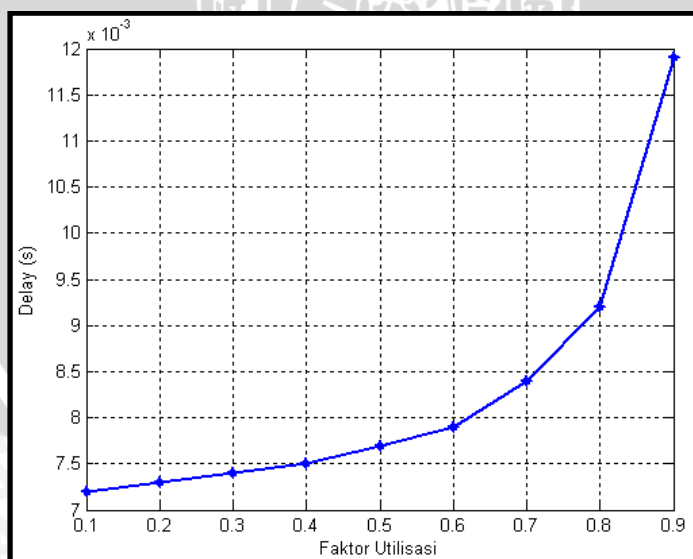
Dengan cara yang sama diperoleh nilai *delay end-to-end* pada jaringan LTE dengan paket data 2502 *byte* dan faktor utilisasi ( $\rho$ ) sebesar 0,2 hingga 0,9 yang ditampilkan dalam Tabel 4.10:

**Tabel 4.10** Hasil Analisis *Delay* total pada jaringan LTE dengan Perubahan Faktor Utilisasi

| No. | Faktor Utilisasi | Delay Total (s) |
|-----|------------------|-----------------|
| 1.  | 0,1              | 0,0072          |
| 2.  | 0,2              | 0,0073          |
| 3.  | 0,3              | 0,0074          |
| 4.  | 0,4              | 0,0075          |
| 5.  | 0,5              | 0,0077          |
| 6.  | 0,6              | 0,0079          |
| 7.  | 0,7              | 0,0084          |
| 8.  | 0,8              | 0,0092          |
| 9.  | 0,9              | 0,0119          |

(Sumber: Hasil Perhitungan)

Dari Tabel 4.10 di atas maka dapat dibuat grafik *delay* total pada jaringan LTE terhadap faktor utilisasi, sebagai berikut:



**Gambar 4.7** Grafik Hubungan *Delay* Total Jaringan LTE terhadap Faktor Utilisasi

Sumber: Analisis, 2012

➤ **Delay Total pada Jaringan UMTS**

Besar *delay end-to-end* pada jaringan UMTS dengan panjang paket data 2502 byte, dan faktor utilisasi 0,1 dapat diperoleh dengan persamaan 2-8 berikut:

$$t_{net \text{ UMTS}} = t_{proc \text{ UMTS}} + t_T \text{ UMTS} + t_P \text{ UMTS} + t_W \text{ UMTS} \\ = 5,3525 \cdot 10^{-2} + 2,1095 \cdot 10^{-2} + 1,76 \cdot 10^{-3} + 10 \cdot 10^{-4} = 0,0773 \text{ s}$$

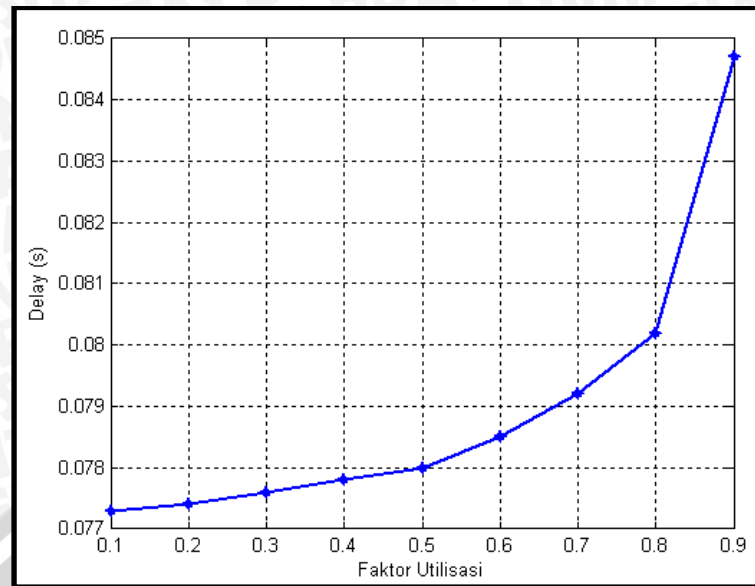
Dengan cara yang sama diperoleh nilai *delay end-to-end* pada jaringan UMTS dengan paket data 2502 byte dan faktor utilisasi ( $\rho$ ) sebesar 0,2 hingga 0,9 yang ditampilkan dalam Tabel 4.11:

**Tabel 4.11** Hasil Analisis *Delay* total pada jaringan UMTS dengan Perubahan Faktor Utilisasi

| No. | Faktor Utilisasi | Delay Total (s) |
|-----|------------------|-----------------|
| 1.  | 0,1              | 0,0773          |
| 2.  | 0,2              | 0,0774          |
| 3.  | 0,3              | 0,0776          |
| 4.  | 0,4              | 0,0778          |
| 5.  | 0,5              | 0,0780          |
| 6.  | 0,6              | 0,0785          |
| 7.  | 0,7              | 0,0792          |
| 8.  | 0,8              | 0,0806          |
| 9.  | 0,9              | 0,0847          |

(Sumber: Hasil Perhitungan)

Dari Tabel 4.11 di atas maka dapat dibuat grafik *delay* total pada jaringan UMTS terhadap faktor utilisasi, sebagai berikut:



**Gambar 4.8** Grafik Hubungan *Delay* Total Jaringan UMTS terhadap Faktor Utilisasi  
**Sumber:** Analisis, 2012

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan baik melalui matematis maupun grafis, maka dapat dijelaskan bahwa:

- *Delay* jaringan dalam perhitungan di atas meliputi *delay* proses yang dipengaruhi oleh kecepatan pemrosesan pada pengirim dan penerima, *delay* transmisi yang dipengaruhi oleh kecepatan pemrosesan di setiap node, *delay* propagasi yang dipengaruhi jarak antar *node* dan media propagasi yang digunakan, serta *delay* antrian yang dipengaruhi oleh faktor utilitas pada jaringan.
- Pada Jaringan UMTS maupun LTE, semakin besar faktor utilisasi yang digunakan, maka *delay* antrian yang akan semakin besar, sehingga *end-to-end* jaringan juga akan semakin besar. Faktor utilisasi menunjukkan besarnya pemakaian jaringan oleh *user*. Besarnya faktor utilisasi mempengaruhi waktu pemrosesan paket di setiap *node*.
- Pada jaringan UMTS, nilai *delay* total terbesar terdapat pada faktor utilisasi 0,9 yaitu sebesar 0,0847 s. Sedangkan nilai *delay* total terkecil terdapat pada faktor utilisasi 0,1 yaitu sebesar 0,0773 s.
- Pada jaringan LTE, nilai *delay* total terbesar terjadi pada faktor utilisasi 0,9 yaitu sebesar 0,0119 s, sedangkan *delay* total terkecil terdapat pada faktor utilisasi 0,1 yaitu sebesar 0,0072 s.

#### 4.5 Perhitungan *Throughput*

*Throughput* merupakan parameter yang digunakan untuk mengetahui jumlah paket yang diterima dalam keadaan baik terhadap waktu total transmisi yang dibutuhkan dari server hingga ke user. Analisis perhitungan *throughput* yang dilakukan dalam skripsi ini adalah hubungan antara server hingga ke UE.

##### ➤ Perhitungan *Throughput* pada jaringan UMTS

Pada jaringan UMTS diketahui bahwa probabilitas *blocking* sebesar  $10^{-7}$  (IMT-2000). Maka besarnya probabilitas *packet loss* untuk data video *streaming* yang terjadi sesuai dengan persamaan 2-97:

$$\begin{aligned}\rho_{vs} &= P_{vs \text{ size}} \times \rho_b \\ &= 2502 \times 8 \times 10^{-7} \\ &= 2,0016 \cdot 10^{-3}\end{aligned}$$

Probabilitas *packet loss* pada jaringan UMTS dihitung dari probabilitas *packet loss* pada UMTS *air interface*, RAN (Node B dan RNC), *core network* (GGSN dan SGSN), dan server sesuai persamaan 2-99.

$$\begin{aligned}\rho_{\text{server}} &= (l-l') \rho_b \\ &= 2634 \times 8 \times 10^{-7} \\ &= 2,1072 \times 10^{-3}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\rho_{\text{SGSN}} &= (l-l') \rho_b \\ &= 2915 \times 8 \times 10^{-7} \\ &= 2,332 \times 10^{-3}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\rho_{\text{GGSN}} &= (l-l') \rho_b \\ &= 2650 \times 8 \times 10^{-7} \\ &= 2,12 \times 10^{-3}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\rho_{\text{RAN}} &= (l-l') \rho_b \\ &= 2961 \times 8 \times 10^{-7} \\ &= 2,368 \times 10^{-3}\end{aligned}$$

Standar nilai BER dalam jaringan UMTS diketahui sebesar  $10^{-6}$  (IMT-2000), maka dapat diperoleh besarnya probabilitas *frame error* pada *air interface* sesuai persamaan 2-100:

$$\begin{aligned}\rho_{\text{AI}} &= 1 - (1 - P_e)^{l+l'} \\ &= 1 - (1 - 10^{-6})^{2961 \times 8} \\ &= 1 - (1 - 10^{-6})^{23688} \\ &= 0,0234\end{aligned}$$

Sehingga dengan persamaan 2-97 dapat diperoleh probabilitas *packet loss* pada jaringan UMTS.

$$\begin{aligned}\rho_{net\ UMTS} &= 1 - [(1 - \rho_{AI})(1 - \rho_{RNC})^h(1 - \rho_{SGSN})(1 - \rho_{GGSN})(1 - \rho_{server})] \\ &= 1 - [(1 - 0,0234)(1 - 2,368.10^{-3})^2(1 - 2,332.10^{-3})(1 - 2,12.10^3) \\ &\quad (1 - 2,1072.10^{-3})] \\ &= 0,034488\end{aligned}$$

Probabilitas *packet loss* total pada jaringan UMTS dapat dihitung dengan persamaan 2-96:

$$\begin{aligned}\rho_{tot\ UMTS} &= 1 - (1 - \rho_{net\ UMTS})(1 - \rho_{mobile\ tv}) \\ &= 1 - (1 - 0,034488)(1 - 2,0016.10^{-3}) \\ &= 0,03652\end{aligned}$$

Waktu yang dibutuhkan untuk pentransmisian satu *frame* ditentukan melalui persamaan 2-95, yaitu:

$$\begin{aligned}t_1 &= \frac{(Pl_{frame} + H_{frame}) \times 8}{C_{trans}} \\ &= \frac{2961 \times 8}{384 \times 10^3} = 0,0617s\end{aligned}$$

*Delay* propagasi total dan *delay* proses total untuk satu *frame* dapat dihitung dengan persamaan 2-93 dan 2-94:

$$\begin{aligned}t_p &= \frac{t_{P(UMTS)}}{N_{frame}} \\ &= \frac{1,76 \times 10^{-3}}{63} \\ &= 2,794.10^{-5} s \\ t_{proc} &= \frac{t_{proc}}{N_{frame}} + \frac{t_{Wtotal}}{N_{frame}} \\ &= \left( \frac{5,3525.10^2}{63} + \frac{10.10^{-4}}{63} \right) s \\ &= 8,6547.10^{-4} s\end{aligned}$$

*Fixed timeout interval* dapat diperoleh sesuai dengan persamaan 2-92 sebesar:

$$\begin{aligned}t_{out} &= 2t_p + 2t_I + t_{proc} \\ &= (2 \times 2,794.10^{-5}) + (2 \times 0,0617) + (8,6547.10^{-4}) \\ &= 0,1243 s\end{aligned}$$

Maka konstanta  $\alpha$  dapat diperoleh sesuai dengan persamaan 2-92:

$$\begin{aligned}\alpha &= 1 + \frac{t_{out}}{t_I} \\ &= 1 + \frac{0,1236}{0,0617} = 3,015\end{aligned}$$

Sehingga diperoleh besarnya *throughput* pada jaringan UMTS dengan faktor utilisasi 0,1 untuk paket data 2502 *byte* sesuai dengan persamaan 2-91:

$$\begin{aligned}\lambda &= \frac{(1 - \rho_{tot})}{t_I [1 + \alpha - 1 \rho_{tot}]} \\ &= \frac{(1 - 0,03652)}{0,0617 [1 + 3,015 - 1 \cdot 0,03652]} \\ &= 14,5539 \text{ paket/s} \\ &= 14,5539 \times 2961 \times 8 \text{ bps} \\ &= 3,4475 \times 10^5 \text{ bps}\end{aligned}$$

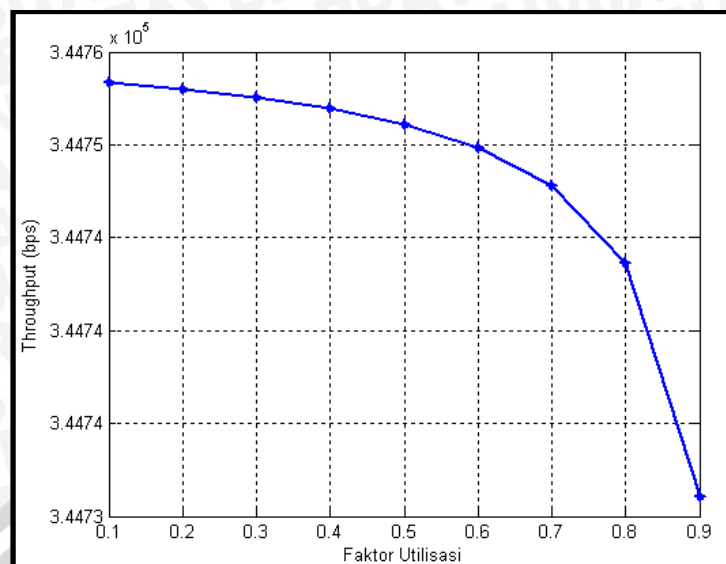
Dengan cara yang sama diperoleh nilai *throughput* pada jaringan UMTS dengan faktor utilisasi ( $\rho$ ) sebesar 0,2 hingga 0,9 seperti pada Tabel berikut:

**Tabel 4.12** Hasil Analisis *throughput* pada jaringan UMTS dengan Perubahan Faktor Utilisasi

| No. | Faktor Utilisasi | <i>Throughput</i> (s) |
|-----|------------------|-----------------------|
| 1.  | 0,1              | $3,4475 \cdot 10^5$   |
| 2.  | 0,2              | $3,4475 \cdot 10^5$   |
| 3.  | 0,3              | $3,4475 \cdot 10^5$   |
| 4.  | 0,4              | $3,4475 \cdot 10^5$   |
| 5.  | 0,5              | $3,4475 \cdot 10^5$   |
| 6.  | 0,6              | $3,4475 \cdot 10^5$   |
| 7.  | 0,7              | $3,4475 \cdot 10^5$   |
| 8.  | 0,8              | $3,4474 \cdot 10^5$   |
| 9.  | 0,9              | $3,4473 \cdot 10^5$   |

(Sumber: Hasil Perhitungan)

Dari Tabel 4.12 di atas maka dapat dibuat grafik *throughput* pada jaringan UMTS terhadap faktor utilisasi, sebagai berikut:



**Gambar 4.9** Grafik Hubungan *Throughput* Jaringan UMTS terhadap Faktor Utilisasi

Sumber: Analisis, 2012

#### ➤ Perhitungan *Throughput* pada jaringan LTE

Pada jaringan LTE diketahui bahwa probabilitas *blocking* sebesar  $10^{-8}$  (Rezaei Fahimeh, white paper 2010). Maka besarnya probabilitas *packet loss* untuk data *video streaming* yang terjadi sesuai dengan persamaan 2-97:

$$\begin{aligned}\rho_{vs} &= P_{vs \text{ size}} \times \rho_b \\ &= 2502 \times 8 \times 10^{-8} \\ &= 2,0016 \cdot 10^{-4}\end{aligned}$$

Probabilitas *packet loss* pada jaringan LTE dihitung dari probabilitas *packet loss* pada LTE *air interface*, eNodeB, core network (PDN-GW dan S-GW), dan server sesuai persamaan 2-99:

$$\begin{aligned}\rho_{\text{server}} &= (l-l') \rho_b \\ &= 2634 \times 8 \times 10^{-8} \\ &= 2,1072 \times 10^{-4}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\rho_{\text{PDN-GW}} &= (l-l') \rho_b \\ &= 2650 \times 8 \times 10^{-8} \\ &= 2,12 \times 10^{-4}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\rho_{\text{S-GW}} &= (l-l') \rho_b \\ &= 2650 \times 8 \times 10^{-8} \\ &= 2,12 \times 10^{-4}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\rho_{\text{eNodeB}} &= (l-l') \rho_b \\ &= 2677,5 \times 8 \times 10^{-8} \\ &= 2,142 \times 10^{-4}\end{aligned}$$

Standar nilai BER dalam jaringan LTE diketahui sebesar  $10^{-9}$  (Rezaei Fahimeh, white paper 2010), maka dapat diperoleh besarnya probabilitas *frame error* pada *air interface* sesuai persamaan 2-100:

$$\begin{aligned}\rho_{AI} &= 1 - (1 - P_e)^{l+l} \\ &= 1 - (1 - 10^{-9})^{2677,5 \times 8} \\ &= 1 - (1 - 10^{-9})^{21420} \\ &= 2,142.10^{-5}\end{aligned}$$

Sehingga dengan persamaan 2-98 dapat diperoleh probabilitas *packet loss* pada jaringan LTE.

$$\begin{aligned}\rho_{net\ UMTS} &= 1 - [(1 - \rho_{AI})(1 - \rho_{eNode\ B})(1 - \rho_{S-GW})(1 - \rho_{PDN-GW})(1 - \rho_{server})] \\ &= 1 - [(1 - 2,142.10^{-5})(1 - 2,142.10^{-4})(1 - 2,12.10^{-4})(1 - 2,12.10^{-4}) \\ &\quad (1 - 2,1072.10^{-4})] \\ &= 4,0936.10^{-3}\end{aligned}$$

Probabilitas *packet loss* total pada jaringan LTE dapat dihitung dengan persamaan 2-96:

$$\begin{aligned}\rho_{tot\ LTE} &= 1 - (1 - \rho_{net\ LTE})(1 - \rho_{vs}) \\ &= 1 - (1 - 4,0936.10^{-3})(1 - 2,0016.10^{-4}) = 5,995.10^{-3}\end{aligned}$$

Waktu yang dibutuhkan untuk pentransmisian satu *frame* ditentukan melalui persamaan 2-95, yaitu:

$$\begin{aligned}t_1 &= \frac{(Pl_{frame} + H_{frame}) \times 8}{C_{trans}} \\ &= \frac{2677,5 \times 8}{3,6.10^6} = 0,00595s\end{aligned}$$

*Delay* propagasi total dan *delay* proses total untuk satu *frame* dapat dihitung dengan persamaan 2-93 dan 2-94:

$$\begin{aligned}t_p &= \frac{t_{p(LTE)}}{N_{frame}} \\ &= \frac{2,8 \times 10^{-4}}{63} \\ &= 4,4444.10^{-6}\ s \\ t_{proc} &= \frac{t_{proc}}{N_{frame}} + \frac{t_{wtotal}}{N_{frame}} \\ &= \left( \frac{5,864.10^{-3}}{63} + \frac{5.10^{-4}}{63} \right) s \\ &= 1,078.10^{-4}\ s\end{aligned}$$

*Fixed timeout interval* dapat diperoleh sesuai dengan persamaan 2-92 sebesar:

$$\begin{aligned} t_{out} &= 2t_p + 2t_I + t_{proc} \\ &= (2 \times 4,4444 \cdot 10^{-6}) + (2 \times 0,00595) + (1,026 \cdot 10^{-4}) \\ &= 1,20114 \times 10^{-2} s \end{aligned}$$

Maka konstanta  $\alpha$  dapat diperoleh sesuai dengan persamaan 2-92:

$$\begin{aligned} \alpha &= 1 + \frac{t_{out}}{t_I} \\ &= 1 + \frac{0,01192}{0,00595} = 3,019 \end{aligned}$$

Sehingga diperoleh besarnya *throughput* pada jaringan LTE dengan faktor utilisasi 0,1 untuk paket data 2502 byte adalah 2-91:

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{(1 - \rho_{tot})}{t_I [1 + \alpha - 1 \rho_{tot}]} \\ &= \frac{(1 - 5,995 \cdot 10^{-3})}{0,00595 [1 + 3,019 - 1 \cdot 5,995 \cdot 10^{-3}]} \\ &= 167,525 \text{ paket/s} \\ &= 167,525 \times 2677,5 \times 8 \text{ bps} = 3,5884 \times 10^6 \text{ bps} \end{aligned}$$

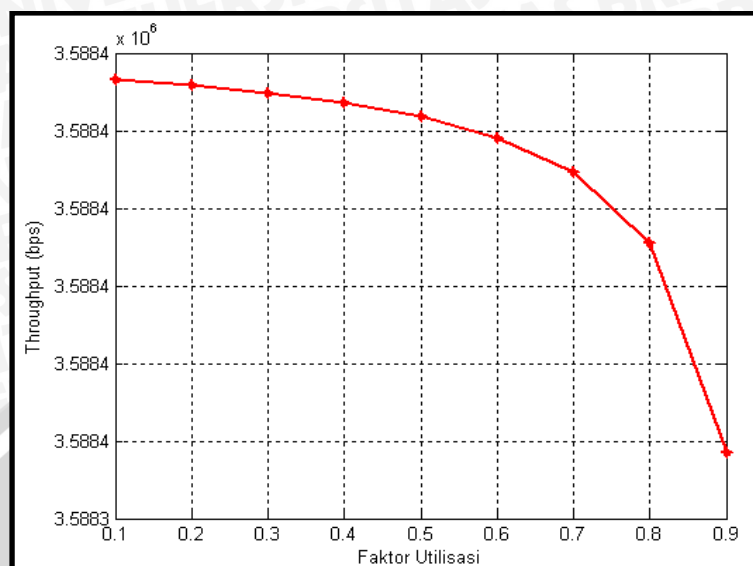
Dengan cara yang sama diperoleh nilai *throughput* pada jaringan LTE dengan faktor utilisasi ( $\rho$ ) sebesar 0,2 hingga 0,9 seperti pada Tabel berikut:

**Tabel 4.13** Hasil Analisis *throughput* pada jaringan LTE dengan Perubahan Faktor Utilisasi

| No. | Faktor Utilisasi | Throughput (s)       |
|-----|------------------|----------------------|
| 1.  | 0,1              | $3,5884 \times 10^6$ |
| 2.  | 0,2              | $3,5884 \times 10^6$ |
| 3.  | 0,3              | $3,5884 \times 10^6$ |
| 4.  | 0,4              | $3,5884 \times 10^6$ |
| 5.  | 0,5              | $3,5884 \times 10^6$ |
| 6.  | 0,6              | $3,5884 \times 10^6$ |
| 7.  | 0,7              | $3,5884 \times 10^6$ |
| 8.  | 0,8              | $3,5884 \times 10^6$ |
| 9.  | 0,9              | $3,5883 \times 10^6$ |

(Sumber: Hasil Perhitungan)

Dari Tabel 4.13 di atas maka dapat dibuat grafik *throughput* pada jaringan LTE terhadap faktor utilisasi, sebagai berikut:



**Gambar 4.10** Grafik Hubungan *Throughput* Jaringan LTE terhadap Faktor Utilisasi  
Sumber: Analisis, 2012

Berdasarkan analisis yang dilakukan secara matematis maupun grafis dapat dijelaskan bahwa:

- Pada pengiriman data dari *Server* ke UE melalui jaringan LTE maupun UMTS menunjukkan bahwa nilai *throughput* pada jaringan dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain besar data yang dikirimkan, *delay* enkapsulasi dan dekapsulasi, *delay* antrian, faktor utilisasi, serta *packet loss*. Selain itu kenaikan faktor utilisasi akan menyebabkan penurunan nilai *throughput* jaringan, namun penurunan yang terjadi relatif kecil sehingga dapat dikatakan bahwa *throughput* pada jaringan LTE dan UMTS relatif konstan untuk semua faktor utilisasi.

#### 4.4 Analisis *Delay Handover*, dan Pengaruhnya

Pada analisis skripsi ini akan dibahas mengenai *delay handover*, serta pengaruhnya pada *throughput* jaringan UMTS. Proses kalkulasi *delay handover* dari jaringan LTE ke UMTS dihitung berdasarkan jumlah *message* yang dikirimkan selama proses *handover*. Jumlah *message* yang dikirimkan selama proses *handover* merupakan *message* yang berukuran 64 bit (8 byte) yang dibangkitkan sebagai ICMP (*Internet Control Message Protocol*) *message* dan payload Video Streaming. *Message* yang akan dikirimkan tersebut akan ditambahkan dengan *header IP* dan 8 byte *original IP payload* (Shivendra Panwar, 1997:43).

### ▪ Pada Jaringan UMTS

Datagram paket untuk *handover* adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} W_{\text{datagram}} &= W_{\text{ICMP}} + W_{\text{VS}} \\ &= 8\text{byte} + 2502 = 2510\text{byte} \end{aligned}$$

Pada UE, ICMP message yang dibangkitkan akan dienkapsulasi dengan menambahkan 8 byte original IP payload dan 40 byte header IP. Sehingga panjang frame IP adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} W_{\text{frameIP}} &= W_{\text{datagram}} + \text{Original}_{\text{IPPayload}} + \text{Header}_{\text{IP}} \\ &= 2510\text{byte} + 8\text{byte} + 40\text{byte} \\ &= 2558\text{ byte} \end{aligned}$$

Selanjutnya paket data aplikasi tersebut dienkapsulasi pada layer PDCP (*Packet Data Convergence Protocol*) dengan menambahkan header PDCP sebesar 1 byte.

$$\begin{aligned} W_{\text{framePDCP}} &= W_{\text{frameIP}} + \text{Header}_{\text{PDCP}} \\ &= 2558\text{byte} + 1\text{byte} \\ &= 2559\text{ byte} \end{aligned}$$

Selanjutnya data akan dienkapsulasi dengan menambahkan header RLC. Sehingga panjang frame RLC dapat dikalkulasikan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} W_{\text{frameRLC}} &= W_{\text{framePDCP}} + \text{Header}_{\text{RLC}} \\ &= 2559\text{byte} + 2\text{byte} \\ &= 2561\text{ byte} \end{aligned}$$

Pada layer MAC, untuk menjadi paket data yang siap untuk ditransmisikan lewat physical layer maka panjang frame RLC PDU akan ditambah header MAC sebesar 3byte dan CRC 2byte.

$$\begin{aligned} W_{\text{frameMAC}} &= \text{Header}_{\text{MAC}} + W_{\text{frameRLC}} + \text{CRC} \\ &= 3\text{byte} + 2561\text{byte} + 2\text{byte} \\ &= 2566\text{byte} \end{aligned}$$

Selanjutnya frame RLC disegmentasi menjadi MAC SDU sebesar 42byte. Sehingga jumlah frame MAC sebesar:

$$N_{\text{frameMAC}} = \frac{W_{\text{frameRLC}}}{\text{MAC} - \text{SDU}}$$

$$= \frac{256 \text{ byte}}{42 \text{ byte}} \\ = 60,9$$

Sehingga *delay* enkapsulasi pada proses *uplink* 3G UE adalah sebagai berikut:

$$t_{E(UE)} = \frac{W_{\text{frameMAC}} \times 8}{C_{MT}} \\ = \frac{2566 \text{ byte} \times 8}{384 \times 10^3 \text{ bps}} \\ = 5,35 \times 10^{-2} \text{ s}$$

*Delay* transmisi pada pengiriman paket dari UE ke NodeB melalui Uu.Interface UMTS adalah sebagai berikut:

$$t_{T(UuInterface)} = \frac{W_{\text{frameMAC}} \times 8}{n \times C_{MT}} \\ = \frac{2566 \text{ byte} \times 8}{3 \times 384 \times 10^3 \text{ bps}} \\ = 1,78 \times 10^{-2} \text{ s}$$

*Delay* propagasi antara UE ke NodeB pada UMTS adalah:

$$t_{p(UE-NodeB)} = \frac{N_{\text{frameMAC}} \times R}{v} \\ = \frac{60,9 \text{ byte} \times 1000}{3 \times 10^8} \\ = 2,03 \times 10^{-4} \text{ s}$$

Sedangkan *delay* transmisi pada proses *uplink* dari NodeB ke RNC adalah sebagai berikut :

$$t_{T(IubInterface)} = \frac{W_{\text{frameMAC}} \times 8}{C_{IubInterface}} \\ = \frac{2566 \text{ byte} \times 8}{155,52 \times 10^6 \text{ bps}} \\ = 1,32 \times 10^{-4} \text{ s}$$

Dengan *delay* propagasi antara NodeB dan RNC adalah:

$$\begin{aligned} t_{p(NodeB-RNC)} &= \frac{N_{frameMAC} \times R}{v} \\ &= \frac{60,9 \text{ byte} \times 2000}{2 \times 10^8} \\ &= 6,09 \times 10^{-4} \text{ s} \end{aligned}$$

Pada NodeB *interface* sistem transmisi STM-1 yang memberikan kecepatan data sebesar 155,52 Mbps dengan panjang data 2566 *byte*. Besar laju pelayanan paket data didapatkan dengan persamaan:

$$\begin{aligned} \mu_{NodeB} &= \frac{C_{NodeB}}{L} \\ &= \frac{155,52 \cdot 10^6}{2566 \times 8} \\ &= 7576 \text{ paket/s} \end{aligned}$$

Laju kedatangan paket ( $\lambda$ ) sesuai dengan persamaan:

$$\begin{aligned} \lambda_{NodeB} &= \mu_{NodeB} \times \rho_{NodeB} \\ &= 7576 \times 0,1 \\ &= 757,6 \text{ paket/s} \end{aligned}$$

*Delay* antrian dapat ditentukan sesuai dengan persamaan:

$$\begin{aligned} t_{w4} &= \frac{\lambda_{NodeB}}{\mu_{NodeB}(\mu_{NodeB} - \lambda_{NodeB})} + \frac{1}{\mu_{NodeB}} \\ &= \frac{757,6}{7576(7576 - 757,6)} + \frac{1}{7576} \\ &= 1,5 \times 10^{-4} \text{ s} \end{aligned}$$

Dari perhitungan maka didapat *delay* total pada proses *uplink* pada proses pentransmisian dari UE ke RAN dapat dikalkulasikan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} t_{net}(\text{UE-RAN}) &= t_E(\text{UE}) + t_T(\text{Uu Interface}) + t_p(\text{UE-NodeB}) + t_T(\text{Iub Interface}) + t_p(\text{NodeB-RNC}) + t_w(\text{NodeB}) \\ &= 5,35 \cdot 10^{-2} + 1,78 \cdot 10^{-2} + 2,03 \cdot 10^{-4} + 1,32 \cdot 10^{-4} + 6,09 \cdot 10^{-4} + 1,5 \cdot 10^{-4} \\ &= 7,239 \times 10^{-2} \text{ s} \end{aligned}$$

Pada RAN, paket data didekapsulasi dengan *delay* dekapsulasi sebagai berikut:

$$\begin{aligned} t_{D(RAN)} &= \frac{W_{datagram} \times 8}{C_{RAN}} \\ &= \frac{2510 \text{ byte} \times 8}{155,52 \cdot 10^6 \text{ bps}} \\ &= 1,291 \cdot 10^{-4} \text{ s} \end{aligned}$$

Pada RAN, *frame* dari UE akan disegmentasi menjadi *frame* GTP dengan menambahkan *header* IP, *header* UDP, *header* GTP.

$$\begin{aligned} W_{frameGTP} &= W_{datagram} + \text{Header}_{IP} + \text{Header}_{UDP} + \text{Header}_{GTP} \\ &= 2510 \text{ byte} + 40 \text{ byte} + 8 \text{ byte} + 8 \text{ byte} \\ &= 2566 \text{ byte} \end{aligned}$$

Pada *layer* AAL5 *frame* GTP akan diberi *header* sebelum disegmentasi menjadi *fixed size cells* (53 byte) pada *layer* ATM. Besar paket AAL5 yang siap ditransmisikan adalah:

$$\begin{aligned} W_{frameAAL5} &= W_{frameGTP} + \text{Header}_{PAD} + \text{Header}_{CT} \\ &= 2566 \text{ byte} + 48 \text{ byte} + 8 \text{ byte} \\ &= 2622 \text{ byte} \end{aligned}$$

Pada *layer* ATM paket AAL5 akan disegmentasi menjadi *fixed size cells* ATM sebesar 53 byte yang terdiri dari *payload* ATM sebesar 48 byte dan *header* ATM sebesar 5 byte.

$$\begin{aligned} W_{frameATM} &= W_{frameAAL5} + \text{Header}_{ATM} \\ &= 2622 \text{ byte} + 53 \text{ byte} = 2675 \text{ byte} \end{aligned}$$

Dengan jumlah *frame* ATM sebagai berikut:

$$\begin{aligned} N_{frameATM} &= \frac{W_{frameAAL5}}{\text{Payload}_{ATM}} \\ &= \frac{2622 \text{ byte}}{48 \text{ byte}} \\ &= 54,6 \end{aligned}$$

Sehingga nilai *delay* enkapsulasi pada RAN dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$t_{E(RAN)} = \frac{W_{frameATM} \times 8}{C_{RAN}}$$

$$= \frac{2675 \text{ byte} \times 8}{155,52 \cdot 10^6 \text{ bps}}$$

$$= 1,376 \cdot 10^{-4} \text{ s}$$

Delay transmisi pada pengiriman paket dari RNC ke SGSN melalui *Iu Interface*

UMTS adalah sebagai berikut:

$$t_{T(Iu-Interface)} = \frac{W_{frameATM} \times 8}{C_{Iu-Interface}}$$

$$= \frac{2675 \text{ byte} \times 8}{155,52 \cdot 10^6 \text{ bps}}$$

$$= 1,376 \cdot 10^{-4} \text{ s}$$

Delay propagasi antara RNC dan SGSN adalah:

$$t_{P(RNC-SGSN)} = \frac{N_{frameATM} \times R}{v}$$

$$= \frac{54,6 \times 3 \cdot 10^3}{2 \cdot 10^8 \text{ bps}}$$

$$= 8,19 \cdot 10^{-4} \text{ s}$$

Pada RNC digunakan standar *Fast Ethernet* dengan kecepatan 100 Mbps dengan panjang data 2675 *byte*. Besar laju pelayanan paket data didapatkan sesuai dengan persamaan:

$$\mu_{RNC} = \frac{C_{RNC}}{L}$$

$$= \frac{10^8}{2675 \times 8}$$

$$= 4673 \text{ paket/s}$$

Laju kedatangan paket ( $\lambda$ ) sesuai dengan persamaan:

$$\lambda_{RNC} = \mu_{RNC} \times \rho_{RNC}$$

$$= 4673 \times 0,1$$

$$= 467,3 \text{ paket/s}$$

Delay antrian dapat ditentukan sesuai dengan persamaan:

$$t_{w3} = \frac{\lambda_{RNC}}{\mu_{RNC}(\mu_{RNC} - \lambda_{RNC})} + \frac{1}{\mu_{RNC}}$$

$$= \frac{467,3}{4673(4673 - 467,3)} + \frac{1}{4673}$$

$$= 2,4 \times 10^{-4} \text{ s}$$

Dari perhitungan maka didapat *delay* total pada proses *uplink* pada proses pentransmisian dari RNC ke SGSN dapat dikalkulasikan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} t_{\text{net (RNC-SGSN)}} &= t_{D(\text{RAN})} + t_{E(\text{RAN})} + t_{T(\text{lu-Interface})} + t_{p(\text{RNC-SGSN})} + t_{w(\text{RNC})} \\ &= 1,291.10^{-4} + 1,376.10^{-4} + 1,376.10^{-4} + 8,19.10^{-4} + 2,4.10^{-4} \\ &= 1,46 \times 10^{-3} \text{ s} \end{aligned}$$

Proses pentransmisian dari SGSN ke MME mengalami proses dekapsulasi sebagai berikut:

$$\begin{aligned} t_{D(\text{SGSN})} &= \frac{W_{\text{datagram}} \times 8}{C_{\text{SGSN}}} \\ &= \frac{2510 \text{ byte} \times 8}{10^8 \text{ bps}} \\ &= 2,008.10^{-4} \text{ s} \end{aligned}$$

*Frame* yang akan diterima akan mengalami proses enkapsulasi dengan menambahkan *header* GTP, UDP, IP, dan CRC dengan persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} W_{\text{frameSGSN}} &= W_{\text{datagram}} + \text{Header}_{\text{IP}} + \text{Header}_{\text{UDP}} + \text{Header}_{\text{GTP}} + \text{CRC} \\ &= 2510 \text{ byte} + 40 \text{ byte} + 8 \text{ byte} + 8 \text{ byte} + 2 = 2568 \text{ byte} \end{aligned}$$

Sehingga didapat *delay* enkapsulasi pada SGSN adalah:

$$\begin{aligned} t_{E(\text{SGSN})} &= \frac{W_{\text{frameSGSN}} \times 8}{C_{\text{SGSN}}} \\ &= \frac{2568 \text{ byte} \times 8}{155,52.10^6 \text{ bps}} \\ &= 1,321.10^{-4} \text{ s} \end{aligned}$$

Dengan *delay* transmisi pada pengiriman paket dari SGSN ke MME adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} t_{T(\text{SGSN-MME})} &= \frac{W_{\text{frameSGSN}} \times 8}{C_{\text{SGSN}}} \\ &= \frac{2568 \text{ byte} \times 8}{10^8 \text{ bps}} \\ &= 2,0544.10^{-4} \text{ s} \end{aligned}$$

Sedangkan *delay* propagasi antara SGSN dan MME adalah:

$$\begin{aligned} t_{P(SGSN-MME)} &= \frac{N_{frameSGSN} \times R}{v} \\ &= \frac{2 \times 2.10^3}{2.10^8 bps} \\ &= 2.10^{-5} s \end{aligned}$$

Pada SGSN menggunakan teknologi *Fast Ethernet* dengan transmisi data sebesar 100Mbps dan panjang data 2568byte, maka dapat ditentukan laju pelayanan paket sebesar:

$$\begin{aligned} \mu_{SGSN} &= \frac{C_{SGSN}}{L} \\ &= \frac{10^8}{2568 \times 8} \\ &= 4867,6 \text{ paket/s} \end{aligned}$$

Dalam analisis ini diasumsikan bahwa faktor utilisasi berubah dari 0,1 sampai 0,9 dengan kenaikan 0,1. Laju kedatangan paket pada SGSN adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \lambda_{SGSN} &= \mu_{SGSN} \times \rho_{SGSN} \\ &= 4867,6 \times 0,1 \\ &= 486,76 \text{ paket/s} \end{aligned}$$

Sehingga *delay* antrian pada SGSN adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} t_{w2} &= \frac{\lambda_{SGSN}}{\mu_{SGSN} (\mu_{SGSN} - \lambda_{SGSN})} + \frac{1}{\mu_{SGSN}} \\ &= \frac{486,76}{4867,6(4867,6 - 486,76)} + \frac{1}{4867,6} \\ &= 2,282 \times 10^{-4} s \end{aligned}$$

Dari perhitungan didapat *delay* total pada proses *uplink* proses pentransmisian dari SGSN ke MME dengan faktor utilisasi 0,1 :

$$\begin{aligned} t_{net}(SGSN-MME) &= t_D(SGSN) + t_E(SGSN) + t_T(SGSN-MME) + t_P(SGSN-MME) + t_w(SGSN) \\ &= 2,008.10^{-4} + 1,321.10^{-4} + 2,0544.10^{-4} + 2.10^{-5} + 2,282.10^{-4} \\ &= 7,8654 \times 10^{-4} s \end{aligned}$$

Pada MME untuk handover dengan perubahan MME paket akan mengalami proses dekapsulasi dengan besar *delay* dekapsulasi sebagai berikut:

$$\begin{aligned} t_{D(MME)} &= \frac{W_{datagram} \times 8}{C_{SGSN}} \\ &= \frac{2510 \text{ byte} \times 8}{10^8 \text{ bps}} \\ &= 2,008.10^{-4} \text{ s} \end{aligned}$$

*Frame* yang akan diterima akan mengalami proses enkapsulasi dengan menambahkan *header* GTP, UDP, IP dengan persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} W_{frameMME} &= W_{datagram} + \text{Header}_{IP} + \text{Header}_{UDP} + \text{Header}_{GTP} \\ &= 2510 \text{ byte} + 40 \text{ byte} + 8 \text{ byte} + 8 \text{ byte} = 2566 \text{ byte} \end{aligned}$$

Sehingga pada MME akan terjadi *delay* enkapsulasi sebesar:

$$\begin{aligned} t_{E(MME)} &= \frac{W_{frameMME} \times 8}{C_{MME}} \\ &= \frac{2566 \text{ byte} \times 8}{10^8 \text{ bps}} \\ &= 2,052.10^{-4} \text{ s} \end{aligned}$$

Antara MME dan GGSN terjadi *delay* transmisi sebesar:

$$\begin{aligned} t_{T(MME-GGSN)} &= \frac{W_{frameMME} \times 8}{C_{MME}} \\ &= \frac{2566 \text{ byte} \times 8}{10^8 \text{ bps}} \\ &= 2,052.10^{-4} \text{ s} \end{aligned}$$

Pada MME dan GGSN menggunakan media udara dengan jarak 2000 m. Nilai *delay* propagasi antara MME dan GGSN didapat dengan perhitungan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} t_{P(MME-SGSN)} &= \frac{N_{frame} \times R}{v} \\ &= \frac{2 \times 2.10^3}{2.10^8 \text{ bps}} \\ &= 2.10^{-5} \text{ s} \end{aligned}$$

Pada MME menggunakan teknologi *Fast Ethernet* dengan transmisi data sebesar 100Mbps dan panjang data 2566byte, maka dapat ditentukan laju pelayanan paket sebesar:

$$\begin{aligned}\mu_{MME} &= \frac{C_{MME}}{L} \\ &= \frac{10^8}{2566 \times 8} \\ &= 4871 \text{ paket/s}\end{aligned}$$

Dalam analisis ini diasumsikan bahwa faktor utilisasi berubah dari 0,1 sampai 0,9 dengan kenaikan 0,1. Laju kedatangan paket pada MME adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\lambda_{MME} &= \mu_{MME} \times \rho_{MME} \\ &= 4871 \times 0,1 \\ &= 487,1 \text{ paket/s}\end{aligned}$$

Sehingga *delay* antrian pada MME adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}t_{w3} &= \frac{\lambda_{MME}}{\mu_{MME}(\mu_{MME} - \lambda_{MME})} + \frac{1}{\mu_{MME}} \\ &= \frac{487,1}{4871(4871 - 487,1)} + \frac{1}{4871} \\ &= 2,28 \times 10^{-4} \text{ s}\end{aligned}$$

Sehingga pada proses pentransmisian data dari MME dan GGSN dapat diketahui *delay* proses totalnya adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}t_{\text{net}}(\text{MME-GGSN}) &= t_{D(\text{MME})} + t_{E(\text{MME})} + t_{T(\text{MME-GGSN})} + t_{P(\text{MME-GGSN})} + t_{w(\text{MME})} \\ &= 2,008 \cdot 10^{-4} + 2,052 \cdot 10^{-4} + 2,052 \cdot 10^{-4} + 2 \cdot 10^{-5} + 2,28 \cdot 10^{-4} \\ &= 8,592 \times 10^{-4} \text{ s}\end{aligned}$$

Proses pentransmisian dari GGSN ke HLR untuk tujuan registrasi dan manajemen pelanggan mengalami proses dekapsulasi sebagai berikut:

$$\begin{aligned}t_{D(\text{GGSN})} &= \frac{W_{\text{datagram}} \times 8}{C_{\text{GGSN}}} \\ &= \frac{2510 \text{ byte} \times 8}{10^8 \text{ bps}} \\ &= 2,008 \cdot 10^{-4} \text{ s}\end{aligned}$$

Pada Node HLR frame yang ada akan disegmentasi untuk diterapkan MAP (Mobile Application Part) yang akan mengirimkan informasi pensinyalan yang berhubungan dengan update lokasi serta handover yang terjadi. Pada proses tersebut frame akan

dienkapsulasi dengan penambahan header TCAP, SCCP, dan CRC untuk koreksi error yang terjadi. Sehingga diperoleh panjang frame HLR sebagai berikut:

$$\begin{aligned} W_{frameHLR} &= W_{datagram} + Header_{MAP} + Header_{TCAP} + Header_{SCCP} + CRC \\ &= 2510\text{byte} + 13\text{byte} + 13\text{byte} + 13\text{byte} + 3\text{byte} \\ &= 2552\text{byte} \end{aligned}$$

Sehingga pada HLR akan terjadi *delay* enkapsulasi sebesar:

$$\begin{aligned} t_{E(GGSN)} &= \frac{W_{frameHLR} \times 8}{C_{HLR}} \\ &= \frac{2552\text{byte} \times 8}{10^8 \text{bps}} \\ &= 2,042.10^{-4} \text{s} \end{aligned}$$

Antara GGSN dan HLR terjadi delay transmisi sebesar:

$$\begin{aligned} t_{T(Gi-Interface)} &= \frac{W_{frameHLR} \times 8}{C_{HLR}} \\ &= \frac{2552\text{byte} \times 8}{10^8 \text{bps}} \\ &= 2,042.10^{-4} \text{s} \end{aligned}$$

Pada GGSN dan HLR menggunakan media udara dengan jarak 2000 m. Nilai delay propagasi antara GGSN dan HLR didapat dengan perhitungan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} t_{P(GGSN-HLR)} &= \frac{N_{frame} \times R}{v} \\ &= \frac{2 \times 2.10^3}{2.10^8 \text{bps}} \\ &= 2.10^{-5} \text{s} \end{aligned}$$

Sehingga pada proses pentransmisi data dari GGSN ke HLR dapat diketahui delay proses totalnya adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} t_{net(GGSN-HLR)} &= t_{D(GGSN)} + t_{E(GGSN)} + t_{T(Gi-Interface)} + t_{P(GGSN-HLR)} \\ &= 2,008.10^{-4} + 2,042.10^{-4} + 2,042.10^{-4} + 2.10^{-5} \\ &= 6,292 \times 10^{-4} \text{s} \end{aligned}$$

Pada proses downlink dari HLR ke GGSN mengalami proses enkapsulasi dengan panjang frame sebesar:

$$\begin{aligned} W_{frameHLR} &= W_{datagram} + Header_{MAP} + Header_{TCAP} + Header_{SCCP} + CRC \\ &= 2510\text{byte} + 13\text{byte} + 13\text{byte} + 13\text{byte} + 3\text{byte} = 2552\text{byte} \end{aligned}$$

Sehingga pada HLR akan terjadi *delay* enkapsulasi sebesar:

$$\begin{aligned} t_{E(HLR)} &= \frac{W_{frameHLR} \times 8}{C_{HLR}} \\ &= \frac{2552byte \times 8}{10^8 bps} \\ &= 2,042.10^{-4} s \end{aligned}$$

Antara GGSN dan HLR terjadi *delay* transmisi sebesar:

$$\begin{aligned} t_{T(Gi-Interface)} &= \frac{W_{frameHLR} \times 8}{C_{HLR}} \\ &= \frac{2552byte \times 8}{10^8 bps} \\ &= 2,042.10^{-4} s \end{aligned}$$

Pada GGSN dan HLR menggunakan media udara dengan jarak 2000 m. Nilai *delay* propagasi antara GGSN dan HLR didapat dengan perhitungan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} t_{P(GGSN-HLR)} &= \frac{N_{frame} \times R}{v} \\ &= \frac{2 \times 2.10^3}{2.10^8 bps} \\ &= 2.10^{-5} s \end{aligned}$$

Sehingga pada proses pentransmisian data dari HLR ke GGSN dapat diketahui *delay* proses totalnya sebagai berikut:

$$\begin{aligned} t_{net(HLR-GGSN)} &= t_{E(HLR)} + t_{T(Gi-Interface)} + t_{p(HLR-GGSN)} \\ &= 2,042.10^{-4} + 2,042.10^{-4} + 2.10^{-5} \\ &= 4,284 \times 10^{-4} s \end{aligned}$$

Pada GGSN terjadi *delay* dekapsulasi yang dinyatakan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} t_{D(GGSN)} &= \frac{W_{datagram} \times 8}{C_{GGSN}} \\ &= \frac{2510byte \times 8}{10^8 bps} \\ &= 2,008.10^{-4} s \end{aligned}$$

Panjang frame GGSN yang siap untuk ditransmisikan ke MME adalah:

$$\begin{aligned} W_{frameGGSN} &= W_{datagram} + Header_{GTP} + Header_{UDP} + Header_{IP} + Header_{Ethernet} + FCS \\ &= 2510\text{byte} + 8\text{byte} + 8\text{byte} + 40\text{byte} + 14\text{byte} + 4\text{byte} \\ &= 2584\text{byte} \end{aligned}$$

Sehingga diperoleh delay enkapsulasi pada GGSN sebesar:

$$\begin{aligned} t_{E(GGSN)} &= \frac{W_{frameGGSN} \times 8}{C_{GGSN}} \\ &= \frac{2584\text{byte} \times 8}{10^8 \text{bps}} \\ &= 2,067 \cdot 10^{-4} \text{s} \end{aligned}$$

Delay transmisi pada pengiriman paket pada proses downlink dari GGSN ke MME adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} t_{T(GGSN)} &= \frac{W_{frameGGSN} \times 8}{C_{GGSN}} \\ &= \frac{2584\text{byte} \times 8}{10^8 \text{bps}} \\ &= 2,067 \cdot 10^{-4} \text{s} \end{aligned}$$

Sedangkan delay propagasi antara GGSN dan MME adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} t_{P(GGSN-MME)} &= \frac{N_{frameGGSN} \times R}{v} \\ &= \frac{2 \times 2 \cdot 10^3}{3 \cdot 10^8 \text{bps}} \\ &= 1,33 \cdot 10^{-5} \text{s} \end{aligned}$$

Pada GGSN digunakan standar *Fast Ethernet* dengan kecepatan 100 Mbps dengan panjang data 82 byte. Besar laju pelayanan paket data adalah:

$$\begin{aligned} \mu_{GGSN} &= \frac{C_{GGSN}}{L} \\ &= \frac{10^8}{2584 \times 8} \\ &= 4837,5 \text{paket/s} \end{aligned}$$

Laju kedatangan paket ( $\lambda$ ) sesuai dengan persamaan:

$$\begin{aligned}\lambda_{GGSN} &= \mu_{GGSN} \times \rho_{GGSN} \\ &= 4837,5 \times 0,1 \\ &= 483,75 \text{ paket/s}\end{aligned}$$

Delay antrian dapat ditentukan sesuai dengan persamaan:

$$\begin{aligned}t_{w1} &= \frac{\lambda_{GGSN}}{\mu_{GGSN} (\mu_{GGSN} - \lambda_{GGSN})} + \frac{1}{\mu_{GGSN}} \\ &= \frac{483,75}{4837,5(4837,5 - 483,75)} + \frac{1}{4837,5} \\ &= 2,297 \times 10^{-4} \text{ s}\end{aligned}$$

Dari perhitungan maka didapat delay total pada proses downblink pada pentransmisian dari GGSN ke SGSN sebagai berikut:

$$\begin{aligned}t_{\text{net (GGSN-MME)}} &= t_{D(\text{GGSN})} + t_{E(\text{GGSN})} + t_{T(\text{GGSN-MME})} + t_{P(\text{GGSN-MME})} + t_{W(\text{GGSN})} \\ &= 2,008.10^{-4} + 2,067.10^{-4} + 2,067.10^{-4} + 1,33.10^{-5} + 2,297.10^{-4} \\ &= 8,572 \times 10^{-4} \text{ s}\end{aligned}$$

Pada MME paket akan mengalami proses dekapsulasi dengan besar delay dekapsulasi sebagai berikut:

$$\begin{aligned}t_{D(\text{MME})} &= \frac{W_{\text{datagram}} \times 8}{C_{\text{SGSN}}} \\ &= \frac{2510 \text{ byte} \times 8}{10^8 \text{ bps}} \\ &= 2,008.10^{-4} \text{ s}\end{aligned}$$

Frame yang akan diterima akan mengalami proses enkapsulasi dengan menambahkan header GTP, UDP, IP dengan persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}W_{\text{frameMME}} &= W_{\text{datagram}} + \text{Header}_{\text{IP}} + \text{Header}_{\text{UDP}} + \text{Header}_{\text{GTP}} \\ &= 2510 \text{ byte} + 40 \text{ byte} + 8 \text{ byte} + 8 \text{ byte} = 2566 \text{ byte}\end{aligned}$$

Sehingga pada MME akan terjadi delay enkapsulasi sebesar:

$$\begin{aligned}t_{E(\text{MME})} &= \frac{W_{\text{frameMME}} \times 8}{C_{\text{MME}}} \\ &= \frac{2566 \text{ byte} \times 8}{10^8 \text{ bps}} \\ &= 2,052.10^{-4} \text{ s}\end{aligned}$$

Antara MME dan SGSN terjadi delay transmisi sebesar:

$$\begin{aligned} t_{T(MME-SGSN)} &= \frac{W_{frameMME} \times 8}{C_{MME}} \\ &= \frac{2566 \text{ byte} \times 8}{10^8 \text{ bps}} \\ &= 2,052 \cdot 10^{-4} \text{ s} \end{aligned}$$

Pada MME dan SGSN menggunakan media udara dengan jarak 2000 m. Nilai *delay* propagasi antara MME dan SGSN didapat dengan perhitungan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} t_{P(MME-SGSN)} &= \frac{N_{frame} \times R}{v} \\ &= \frac{2 \times 2 \cdot 10^3}{2 \cdot 10^8 \text{ bps}} \\ &= 2 \cdot 10^{-5} \text{ s} \end{aligned}$$

Pada MME menggunakan teknologi *Fast Ethernet* dengan transmisi data sebesar 100Mbps dan panjang data 2566byte, maka dapat ditentukan laju pelayanan paket sebesar:

$$\begin{aligned} \mu_{MME} &= \frac{C_{MME}}{L} \\ &= \frac{10^8}{2566 \times 8} \\ &= 4871 \text{ paket/s} \end{aligned}$$

Dalam analisis ini diasumsikan bahwa faktor utilisasi berubah dari 0,1 sampai 0,9 dengan kenaikan 0,1. Laju kedatangan paket pada MME adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \lambda_{MME} &= \mu_{MME} \times \rho_{MME} \\ &= 4871 \times 0,1 \\ &= 487,1 \text{ paket/s} \end{aligned}$$

Sehingga *delay* antrian pada MME adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} t_{w3} &= \frac{\lambda_{MME}}{\mu_{MME} (\mu_{MME} - \lambda_{MME})} + \frac{1}{\mu_{MME}} \\ &= \frac{487,1}{4871(4871 - 487,1)} + \frac{1}{4871} \\ &= 2,28 \times 10^{-4} \text{ s} \end{aligned}$$

Sehingga pada proses pentransmisian data dari MME dan SGSN dapat diketahui *delay* proses totalnya adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 t_{\text{net}}(\text{MME-SGSN}) &= t_{\text{D}(\text{MME})} + t_{\text{E}(\text{MME})} + t_{\text{T}(\text{MME-SGSN})} + t_{\text{p}(\text{MME-SGSN})} + t_{\text{w}(\text{MME})} \\
 &= 2,008.10^{-4} + 2,052.10^{-4} + 2,052.10^{-4} + 2.10^{-5} + 2,28.10^{-4} \\
 &= 8,592 \times 10^{-4} \text{ s}
 \end{aligned}$$

Pada SGSN paket akan mengalami proses dekapsulasi dengan *delay* sebesar:

$$\begin{aligned}
 t_{\text{D}(\text{SGSN})} &= \frac{W_{\text{datagram}} \times 8}{C_{\text{SGSN}}} \\
 &= \frac{2510 \text{ byte} \times 8}{10^8 \text{ bps}} \\
 &= 2,008.10^{-4} \text{ s}
 \end{aligned}$$

Sehingga jumlah *frame* yang siap untuk ditransmisikan ke AAL5 adalah:

$$\begin{aligned}
 W_{\text{frameAAL5}} &= W_{\text{datagram}} + \text{Header}_{\text{GTP}} + \text{Header}_{\text{UDP}} + \text{Header}_{\text{IP}} + \text{Header}_{\text{AAL5(PAD-CT)}} \\
 &= 2510 \text{ byte} + 8 \text{ byte} + 8 \text{ byte} + 40 \text{ byte} + 48 \text{ byte} + 8 \text{ byte} \\
 &= 2622 \text{ byte}
 \end{aligned}$$

Pada *layer* ATM, *frame* AAL5 akan disegmentasi menjadi *fixed size cells* ATM sebesar 53byte yang terdiri dari *payload* ATM sebesar 48byte dan *header* ATM 5byte:

$$\begin{aligned}
 N_{\text{frameATM}} &= \frac{W_{\text{frameAAL5}}}{\text{Payload}_{\text{ATM}}} \\
 &= \frac{2622 \text{ byte}}{48 \text{ byte}} \\
 &= 54,6
 \end{aligned}$$

Setelah tersegmentasi *frame-frame* ini dienkapsulasi untuk disesuaikan dengan panjang *frame* ATM. Sehingga diperoleh panjang *frame* ATM masing-masing sebesar:

$$\begin{aligned}
 W_{\text{frameATM}} &= \text{Payload}_{\text{ATM}} + \text{Header}_{\text{ATM}} \\
 &= 48 \text{ byte} + 5 \text{ byte} = 53 \text{ byte}
 \end{aligned}$$

Sehingga jumlah *frame* SGSN yang akan ditransmisikan ke RAN sama dengan jumlah *frame* ATM:

$$\begin{aligned}
 W_{\text{frame SGSN}} &= W_{\text{frame ATM total}} = N_{\text{frame ATM}} \times W_{\text{frame ATM}} \\
 &= 54,6 \times 53 \text{ byte} \\
 &= 2893,8 \text{ byte}
 \end{aligned}$$

Nilai *delay* enkapsulasi pada SGSN yang terjadi didapatkan sebagai berikut:

$$t_{\text{E}(\text{SGSN})} = \frac{W_{\text{frameSGSN}} \times 8}{C_{\text{SGSN}}}$$

$$= \frac{2893,8 \text{ byte} \times 8}{155,52 \cdot 10^6 \text{ bps}}$$

$$= 1,4885 \cdot 10^{-4} \text{ s}$$

Hubungan antara SGSN dan RNC menggunakan *interface* sistem tranmisi digital STM-1 yang memberikan kecepatan data sebesar 155,52 Mbps sesuai standard ITU-T G.703. Sehingga nilai *delay* transmisi yang terjadi sesuai dengan persamaan:

$$t_{T(lu-Interface)} = \frac{W_{frameATM} \times 8}{C_{lu-Interface}}$$

$$= \frac{2893,8 \text{ byte} \times 8}{155,52 \cdot 10^6 \text{ bps}}$$

$$= 1,4885 \cdot 10^{-4} \text{ s}$$

Hubungan antara SGSN ke RNC menggunakan fiber optik dengan jarak 3000 m. Nilai *delay* propagasi antara SGSN dengan RNC sesuai dengan persamaan:

$$t_{p-SGSN} = \frac{N_{frameSGSN} \times R}{v}$$

$$= \frac{54,6 \times 3 \cdot 10^3}{2 \cdot 10^8}$$

$$= 8,19 \cdot 10^{-4} \text{ s}$$

Pada SGSN digunakan standar *Fast Ethernet* dengan kecepatan 100 Mbps dengan panjang data 2893,8byte. Besar laju pelayanan paket data didapatkan sesuai dengan persamaan:

$$\mu_{SGSN} = \frac{C_{SGSN}}{L}$$

$$= \frac{10^8}{2893,8 \times 8}$$

$$= 4319,58 \text{ paket/s}$$

Laju kedatangan paket ( $\lambda$ ) sesuai dengan persamaan:

$$\lambda_{SGSN} = \mu_{SGSN} \times \rho_{SGSN}$$

$$= 4319,58 \times 0,1$$

$$= 431,958 \text{ paket/s}$$

*Delay* antrian dapat ditentukan sesuai dengan persamaan:

$$t_{w2} = \frac{\lambda_{SGSN}}{\mu_{SGSN} (\mu_{SGSN} - \lambda_{SGSN})} + \frac{1}{\mu_{SGSN}}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{431,958}{4319,58(4319,58 - 431,958)} + \frac{1}{4319,58} \\
 &= 2,572 \times 10^{-4} \text{ s}
 \end{aligned}$$

Dari perhitungan maka didapat *delay* total pada proses *downlink* pada pentransmisian dari SGSN ke RAN sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 t_{\text{net}}(\text{SGSN-RAN}) &= t_D(\text{SGSN}) + t_E(\text{SGSN}) + t_{\text{T(Gn-Interface)}} + t_p(\text{SGSN-RAN}) + t_w(\text{SGSN}) \\
 &= 2,008.10^{-4} + 1,4885.10^{-4} + 1,4885.10^{-4} + 8,19.10^{-4} + 2,572.10^{-4} \\
 &= 1,5747 \times 10^{-5} \text{ s}
 \end{aligned}$$

Pada RAN, paket data didekapsulasi dengan *delay* dekapsulasi sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 t_{D(\text{RAN})} &= \frac{W_{\text{datagram}} \times 8}{C_{\text{RAN}}} \\
 &= \frac{2510 \text{ byte} \times 8}{155,52.10^6 \text{ bps}} \\
 &= 1,291.10^{-4} \text{ s}
 \end{aligned}$$

Pada RAN, *frame* akan disegmentasi menjadi PDCP data PDU (*Protocol Data Unit*) dengan menambahkan *header* PDU *type* sebesar 3bit dan PID (*Paket Identifier*) sebesar 5bit, jadi total ada 8bit atau 1byte. (3GPP TS 22.323 Rel.5).

$$\begin{aligned}
 W_{\text{framePDCP}} &= W_{\text{datagram}} + \text{Header}_{\text{PDCP}} \\
 &= 2510 \text{ byte} + 1 \text{ byte} \\
 &= 2511 \text{ byte}
 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
 N_{\text{frameRLC}} &= \frac{W_{\text{framePDCP}}}{40 \text{ byte}} \\
 &= \frac{2511 \text{ byte}}{40 \text{ byte}} \\
 &= 62,7
 \end{aligned}$$

Kemudian *frame* RLC dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$\begin{aligned}
 W_{\text{frameRLC}} &= 40 \text{ byte} + \text{Header}_{\text{RLC}} \\
 &= 40 \text{ byte} + 2 \text{ byte}
 \end{aligned}$$

$$= 42 \text{ byte}$$

Jumlah total *frame* RLC PDU yang dikirimkan ke MAC adalah:

$$\begin{aligned} W_{\text{frameRLCtotal}} &= N_{\text{frameRLC}} \times W_{\text{frameRLC}} \\ &= 62,7 \times 42 \text{ byte} \\ &= 2633,4 \text{ byte} \end{aligned}$$

Pada *layer* MAC, RLC PDU akan disegmentasi menjadi MAC SDU. Besarnya MAC SDU tergantung pada besarnya RLC PDU yang telah ditetapkan yaitu sebesar 42byte. Sehingga jumlah *frame* MAC PDU adalah:

$$\begin{aligned} N_{\text{frameMAC}} &= \frac{W_{\text{frameRLCtotal}}}{42 \text{ byte}} \\ &= \frac{2633,4 \text{ byte}}{42 \text{ byte}} \\ &= 62,7 \end{aligned}$$

Kemudian *frame* RLC dapat dihitung dengan persamaan:

$$\begin{aligned} W_{\text{frameMAC}} &= \text{Header}_{\text{MAC}} + 42 \text{ byte} + \text{CRC} \\ &= 3 \text{ byte} + 42 \text{ byte} + 3 \text{ byte} \\ &= 48 \text{ byte} \end{aligned}$$

Sehingga jumlah *frame* RAN yang siap dikirimkan ke UE sama dengan jumlah *frame* MAC, yaitu:

$$\begin{aligned} W_{\text{frame RAN}} &= W_{\text{frame MAC total}} = N_{\text{frame MAC}} \times W_{\text{frame MAC}} \\ &= 62,7 \times 48 \text{ byte} \\ &= 3009,6 \text{ byte} \end{aligned}$$

Nilai *delay* enkapsulasi pada RAN yang terjadi didapatkan dengan proses sebagai berikut:

$$\begin{aligned} t_{E(\text{RAN})} &= \frac{W_{\text{frameRAN}} \times 8}{C_{\text{RAN}}} \\ &= \frac{3009,6 \text{ byte} \times 8}{155,52 \cdot 10^6 \text{ bps}} \\ &= 1,548 \cdot 10^{-4} \text{ s} \end{aligned}$$

*Delay* transmisi pada pengiriman paket dari *NodeB* ke UE melalui *Uu.Interface* UMTS dengan kecepatan 384kbps untuk paket data 3009,6byte adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} t_{T(UuInterface)} &= \frac{W_{frameMACtotal} \times 8}{n \times C_{MT}} \\ &= \frac{3009,6 \text{ byte} \times 8}{3 \times 384 \times 10^3 \text{ bps}} \\ &= 2,09 \times 10^{-2} \text{ s} \end{aligned}$$

Dengan *delay* propagasi sebesar:

$$\begin{aligned} t_{p(BTS-UE)} &= \frac{N_{frameRLCradioblok} \times R}{v} \\ &= \frac{62,7 \text{ byte} \times 2000}{3 \times 10^8} \\ &= 4,18 \times 10^{-4} \text{ s} \end{aligned}$$

Pada RAN digunakan standar *Fast Ethernet* dengan kecepatan 100 Mbps dengan panjang data 3009,6 *byte*. Besar laju pelayanan paket data didapatkan sesuai dengan persamaan:

$$\begin{aligned} \mu_{RAN} &= \frac{C_{RAN}}{L} \\ &= \frac{10^8}{3009,6 \times 8} \\ &= 4153 \text{ paket/s} \end{aligned}$$

Laju kedatangan paket ( $\lambda$ ) sesuai dengan persamaan:

$$\begin{aligned} \lambda_{RAN} &= \mu_{RAN} \times \rho_{RAN} \\ &= 4153 \times 0,1 = 415,3 \text{ paket/s} \end{aligned}$$

*Delay* antrian dapat ditentukan sesuai dengan persamaan:

$$\begin{aligned} t_{w3} &= \frac{\lambda_{RAN}}{\mu_{RAN}(\mu_{RAN} - \lambda_{RAN})} + \frac{1}{\mu_{RAN}} \\ &= \frac{415,3}{4153(4153 - 415,3)} + \frac{1}{4153} \\ &= 2,67 \times 10^{-4} \text{ s} \end{aligned}$$

Dari perhitungan maka didapat *delay* total pada proses *downlink* pada pentransmisian dari RAN ke UE sesuai persamaan berikut:

$$\begin{aligned} t_{\text{net (RAN-UE)}} &= t_{D(RAN)} + t_{E(RAN)} + t_{T(Uu-Interface)} + t_{p(NodeB-UE)} + t_{w(RAN)} \\ &= 1,291 \cdot 10^{-4} + 1,548 \cdot 10^{-4} + 2,09 \cdot 10^{-2} + 4,18 \cdot 10^{-4} + 2,67 \cdot 10^{-4} \\ &= 2,187 \times 10^{-2} \text{ s} \end{aligned}$$

- **Pada Jaringan LTE**

$$\begin{aligned} W_{\text{datagram}} &= W_{\text{ICMP}} + W_{\text{VS}} \\ &= 8\text{byte} + 2502 = 2510\text{byte} \end{aligned}$$

Pada UE, ICMP message yang dibangkitkan akan dienkapsulasi dengan menambahkan 8 byte original IP payload dan 40 byte header IP. Sehingga panjang frame IP adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} W_{\text{frameIP}} &= W_{\text{datagram}} + \text{Original}_{\text{IPPayload}} + \text{Header}_{\text{IP}} \\ &= 2510\text{byte} + 8\text{byte} + 40\text{byte} \\ &= 2558\text{ byte} \end{aligned}$$

Selanjutnya paket data aplikasi tersebut dienkapsulasi pada layer PDCP (*Packet Data Convergence Protocol*) dengan menambahkan header PDCP sebesar 1 byte.

$$\begin{aligned} W_{\text{framePDCP}} &= W_{\text{frameIP}} + \text{Header}_{\text{PDCP}} \\ &= 2558\text{byte} + 1\text{byte} \\ &= 2559\text{ byte} \end{aligned}$$

Selanjutnya data akan dienkapsulasi dengan menambahkan header RLC. Sehingga panjang frame RLC dapat dikalkulasikan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} W_{\text{frameRLC}} &= W_{\text{framePDCP}} + \text{Header}_{\text{RLC}} \\ &= 2559\text{byte} + 2\text{byte} \\ &= 2561\text{ byte} \end{aligned}$$

Pada layer MAC, untuk menjadi paket data yang siap untuk ditransmisikan lewat physical layer maka panjang frame RLC PDU akan ditambah header MAC sebesar 3byte.

$$\begin{aligned} W_{\text{frameMAC}} &= \text{Header}_{\text{MAC}} + W_{\text{frameRLC}} \\ &= 3\text{byte} + 2561\text{byte} = 2564\text{byte} \end{aligned}$$

Selanjutnya frame RLC disegmentasi menjadi MAC SDU sebesar 42byte. Sehingga jumlah frame MAC sebesar:

$$\begin{aligned} N_{\text{frameMAC}} &= \frac{W_{\text{frameRLC}}}{\text{MAC} - \text{SDU}} \\ &= \frac{2561\text{byte}}{42\text{byte}} \\ &= 60,9 \end{aligned}$$

Sehingga delay enkapsulasi pada proses *uplink* UE adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 t_{E(UE)} &= \frac{W_{frameMAC} \times 8}{C_{MT}} \\
 &= \frac{2564 \text{ byte} \times 8}{3,6 \times 10^6 \text{ bps}} \\
 &= 5,69 \times 10^{-3} \text{ s}
 \end{aligned}$$

Delay transmisi pada pengiriman paket dari UE ke eNodeB melalui *Uu.LTE* adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 t_{T(UuLTE)} &= \frac{W_{frameMAC} \times 8}{n \times C_{MT}} \\
 &= \frac{2564 \text{ byte} \times 8}{15 \times (3,6 \times 10^6) \text{ bps}} \\
 &= 3,79 \times 10^{-4} \text{ s}
 \end{aligned}$$

Delay propagasi antara UE ke eNodeB pada LTE adalah:

$$\begin{aligned}
 t_{p(UE-eNodeB)} &= \frac{N_{frameMAC} \times R}{v} \\
 &= \frac{60,9 \text{ byte} \times 1000}{3 \times 10^8} \\
 &= 2,03 \times 10^{-4} \text{ s}
 \end{aligned}$$

Dari perhitungan maka didapat *delay* total pada proses *uplink* pada proses pentransmisi dari UE ke eNodeB dapat dikalkulasikan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 t_{\text{net}(UE-eNodeB)} &= t_{E(UE)} + t_{T(UuLTE)} + t_{p(UE-eNodeB)} \\
 &= 5,69 \cdot 10^{-3} + 3,79 \cdot 10^{-4} + 2,03 \cdot 10^{-4} \\
 &= 6,272 \times 10^{-3} \text{ s}
 \end{aligned}$$

Pada eNodeB, paket data didekapsulasi dengan *delay* dekapsulasi sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 t_{D(eNodeB)} &= \frac{W_{datagram} \times 8}{C_{eNodeB}} \\
 &= \frac{2510 \text{ byte} \times 8}{155,52 \cdot 10^6 \text{ bps}} \\
 &= 1,291 \cdot 10^{-4} \text{ s}
 \end{aligned}$$

Pada proses dekapsulasi, paket data *eNodeB* didapatkan sesuai dengan persamaan berikut:

$$\begin{aligned} W_{frame-eNodeB} &= W_{datagram} + Header_{IP} + Header_{UDP} + Header_{GTP} \\ &= 2510byte + 40byte + 8byte + 8byte = 2566byte \end{aligned}$$

Besar MSS dapat diperoleh sesuai dengan persamaan:

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

Selanjutnya, paket data yang melebihi MSS akan disegmentasi sesuai dengan persamaan berikut:

$$\begin{aligned} N_{frameNodeB} &= \frac{W_{frameNodeB}}{MSS} \\ &= \frac{2566byte}{1444byte} \\ &= 1,777 \end{aligned}$$

Sehingga didapat *delay* enkapsulasi pada *eNodeB* adalah:

$$\begin{aligned} t_{E(eNodeB)} &= \frac{W_{frame-eNodeB} \times 8}{C_{eNodeB}} \\ &= \frac{2566byte \times 8}{155,52 \cdot 10^6 bps} \\ &= 1,32 \cdot 10^{-4} s \end{aligned}$$

Dengan *delay* transmisi pada pengiriman paket dari *eNodeB* ke MME adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} t_{T(eNodeB-MME)} &= \frac{W_{frame-eNodeB} \times 8}{C_{eNodeB}} \\ &= \frac{2566byte \times 8}{10^8 bps} \\ &= 2,052 \cdot 10^{-4} s \end{aligned}$$

Sedangkan *delay* propagasi antara *eNodeB* dan MME adalah:

$$t_{P(eNodeB-MME)} = \frac{N_{frame-eNodeB} \times R}{v}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{2 \times 1500}{3.10^8 \text{ bps}} \\
 &= 1.10^{-5} \text{ s}
 \end{aligned}$$

Pada eNodeB *interface* sistem transmisi STM-1 yang memberikan kecepatan data sebesar 155,52 Mbps dengan panjang data 2564 *byte*. Besar laju pelayanan paket data didapatkan sesuai dengan persamaan berikut:

$$\begin{aligned}
 \mu_{eNodeB} &= \frac{C_{eNodeB}}{L} \\
 &= \frac{155,52.10^6}{2564 \times 8} \\
 &= 7581,9 \text{ paket/s}
 \end{aligned}$$

Laju kedatangan paket ( $\lambda$ ) sesuai dengan persamaan:

$$\begin{aligned}
 \lambda_{eNodeB} &= \mu_{eNodeB} \times \rho_{eNodeB} \\
 &= 7581,9 \times 0,1 \\
 &= 758,19 \text{ paket/s}
 \end{aligned}$$

Delay antrian dapat ditentukan sesuai dengan persamaan:

$$\begin{aligned}
 t_{w3} &= \frac{\lambda_{eNodeB}}{\mu_{eNodeB} (\mu_{eNodeB} - \lambda_{eNodeB})} + \frac{1}{\mu_{eNodeB}} \\
 &= \frac{758,19}{7581,9(7581,9 - 758,19)} + \frac{1}{7581,9} \\
 &= 1,465 \times 10^{-4} \text{ s}
 \end{aligned}$$

Dari perhitungan maka didapat *delay* total pada proses *uplink* pada proses pentransmisian dari UE ke eNodeB dapat dikalkulasikan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 t_{\text{net}}(eNodeB-MME) &= t_D(eNodeB) + t_E(eNodeB) + t_T(eNodeB-MME) + t_P(eNodeB-MME) + t_w(eNodeB) \\
 &= 1,291.10^{-4} + 1,32.10^{-4} + 2,052.10^{-4} + 1.10^{-5} + 1,465.10^{-4} = 6,228 \times 10^{-4} \text{ s}
 \end{aligned}$$

Pada MME paket akan mengalami proses dekapsulasi dengan besar *delay* dekapsulasi sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 t_{D(MME)} &= \frac{W_{\text{datagram}} \times 8}{C_{MME}} \\
 &= \frac{2510 \text{ byte} \times 8}{10^8 \text{ bps}} \\
 &= 2,008.10^{-4} \text{ s}
 \end{aligned}$$

Pada proses dekapsulasi, paket data *MME* didapatkan sesuai dengan persamaan berikut:

$$\begin{aligned} W_{frameMME} &= W_{datagram} + Header_{IP} + Header_{UDP} + Header_{GTP} \\ &= 2510byte + 40byte + 8byte + 8byte = 2566byte \end{aligned}$$

Sehingga pada MME akan terjadi *delay* enkapsulasi sebesar:

$$\begin{aligned} t_{E(MME)} &= \frac{W_{frameMME} \times 8}{C_{MME}} \\ &= \frac{2566byte \times 8}{10^8 bps} \\ &= 2,052 \cdot 10^{-4} s \end{aligned}$$

Antara MME dan SGW terjadi *delay* transmisi sebesar:

$$\begin{aligned} t_{T(MME-SGSN)} &= \frac{W_{frameMME} \times 8}{C_{MME}} \\ &= \frac{2566byte \times 8}{10^8 bps} \\ &= 2,052 \cdot 10^{-4} s \end{aligned}$$

Pada MME dan SGW menggunakan media udara dengan jarak 1500 m. Nilai *delay* propagasi antara MME dan SGW didapat dengan perhitungan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} t_{P(MME-SGW)} &= \frac{N_{frame} \times R}{v} \\ &= \frac{2 \times 1500}{3 \cdot 10^8 bps} \\ &= 1 \cdot 10^{-5} s \end{aligned}$$

Pada MME menggunakan teknologi *Fast Ethernet* dengan transmisi data sebesar 100Mbps dan panjang data 2566byte, maka dapat ditentukan laju pelayanan paket sebesar:

$$\begin{aligned} \mu_{MME} &= \frac{C_{MME}}{L} \\ &= \frac{10^8}{2566 \times 8} \\ &= 4871 paket/s \end{aligned}$$

Dalam analisis ini diasumsikan bahwa faktor utilisasi berubah dari 0,1 sampai 0,9 dengan kenaikan 0,1. Laju kedatangan paket pada MME adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\lambda_{MME} &= \mu_{MME} \times \rho_{MME} \\ &= 4871 \times 0,1 \\ &= 487,1 \text{ paket/s}\end{aligned}$$

Sehingga *delay* antrian pada MME adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}t_{w3} &= \frac{\lambda_{MME}}{\mu_{MME}(\mu_{MME} - \lambda_{MME})} + \frac{1}{\mu_{MME}} \\ &= \frac{487,1}{4871(4871 - 487,1)} + \frac{1}{4871} \\ &= 2,28 \times 10^{-4} \text{ s}\end{aligned}$$

Sehingga pada proses pentransmisian data dari MME dan SGSN dapat diketahui *delay* proses totalnya adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}t_{\text{net}}(\text{MME-SGW}) &= t_{D(\text{MME})} + t_{E(\text{MME})} + t_{T(\text{MME-SGW})} + t_{P(\text{MME-SGW})} + t_{w(\text{MME})} \\ &= 2,008 \cdot 10^{-4} + 2,052 \cdot 10^{-4} + 2,052 \cdot 10^{-4} + 1 \cdot 10^{-5} + 2,28 \cdot 10^{-4} \\ &= 8,492 \times 10^{-4} \text{ s}\end{aligned}$$

Pada S-GW yang menggunakan *Fast Ethernet* dengan kecepatan 100Mbps, paket yang diterima dari *eNodeB* akan mengalami proses dekapsulasi dengan besar *delay* dekapsulasi sebagai berikut:

$$\begin{aligned}t_{D(S-GW)} &= \frac{W_{\text{datagram}} \times 8}{C_{S-GW}} \\ &= \frac{2510 \text{ byte} \times 8}{10^8 \text{ bps}} \\ &= 2,008 \cdot 10^{-4} \text{ s}\end{aligned}$$

*Frame* yang akan diterima akan mengalami proses enkapsulasi dengan menambahkan *header* GTP, UDP, dan IP dengan persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}W_{\text{frameS-GW}} &= W_{\text{datagram}} + \text{Header}_{IP} + \text{Header}_{UDP} + \text{Header}_{GTP} \\ &= 2510 \text{ byte} + 40 \text{ byte} + 8 \text{ byte} + 8 \text{ byte} = 2566 \text{ byte}\end{aligned}$$

Besar MSS dapat diperoleh sesuai dengan persamaan:

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

Selanjutnya, paket data yang melebihi MSS akan disegmentasi sesuai dengan persamaan berikut:

$$\begin{aligned} N_{frameS-GW} &= \frac{W_{frameS-GW}}{MSS} \\ &= \frac{2566byte}{1444byte} \\ &= 1,777 \end{aligned}$$

Sehingga didapat *delay* enkapsulasi pada S-GW adalah:

$$\begin{aligned} t_{E(S-GW)} &= \frac{W_{frameS-GW} \times 8}{C_{S-GW}} \\ &= \frac{2566byte \times 8}{10^8 bps} \\ &= 2,052.10^{-4} s \end{aligned}$$

Dengan *delay* transmisi pada pengiriman paket dari S-GW ke PDN-GW adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} t_{T(s5/s8)} &= \frac{W_{frameS-GW} \times 8}{C_{Ethernet}} \\ &= \frac{2566byte \times 8}{10^8 bps} \\ &= 2,052.10^{-4} s \end{aligned}$$

Sedangkan *delay* propagasi antara S-GW dan PDN-GW adalah:

$$\begin{aligned} t_{P(S-GW-PDN-GW)} &= \frac{N_{frameS-GW} \times R}{v} \\ &= \frac{2 \times 4.10^3}{3.10^8 bps} \\ &= 2,66.10^{-5} s \end{aligned}$$

Pada S-GW menggunakan teknologi *Fast Ethernet* dengan transmisi data sebesar 100Mbps dan panjang data 2566byte, maka dapat ditentukan laju pelayanan paket sebesar:

$$\begin{aligned} \mu_{S-GW} &= \frac{C_{S-GW}}{L} \\ &= \frac{10^8}{2566 \times 8} \\ &= 48714 paket/s \end{aligned}$$

Dalam analisis ini diasumsikan bahwa faktor utilisasi berubah dari 0,1 sampai 0,9 dengan kenaikan 0,1. Laju kedatangan paket pada S-GW adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\lambda_{S-GW} &= \mu_{S-GW} \times \rho_{S-GW} \\ &= 4871,4 \times 0,1 \\ &= 487,14 \text{ paket/s}\end{aligned}$$

Sehingga *delay* antrian pada S-GW adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}t_{w2} &= \frac{\lambda_{S-GW}}{\mu_{S-GW}(\mu_{S-GW} - \lambda_{S-GW})} + \frac{1}{\mu_{S-GW}} \\ &= \frac{487,14}{4871,4(4871,4 - 487,14)} + \frac{1}{4871,4} \\ &= 2,281 \times 10^{-4} \text{ s}\end{aligned}$$

Dari perhitungan didapat *delay* total pada proses *uplink* proses pentransmisian dari S-GW ke PDN-GW dengan faktor utilisasi 0,1 :

$$\begin{aligned}t_{\text{net (S-GW-PDN-GW)}} &= t_{D(S-GW)} + t_{E(S-GW)} + t_{T((S-GW)-(PDN-GW))} + t_{P((S-GW)-(PDN-GW))} + t_{w(S-GW)} \\ &= 2,008.10^{-4} + 2,052.10^{-4} + 2,052.10^{-4} + 2,66.10^{-5} + 2,281.10^{-4} \\ &= 8,659 \times 10^{-4} \text{ s}\end{aligned}$$

Pada PDN-GW terjadi *delay* dekapsulasi yang dinyatakan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}t_{D(PDN-GW)} &= \frac{W_{\text{datagram}} \times 8}{C_{PDN-GW}} \\ &= \frac{2510 \text{ byte} \times 8}{10^8 \text{ bps}} \\ &= 2,008.10^{-4} \text{ s}\end{aligned}$$

Panjang *frame* PDN-GW yang siap untuk ditransmisikan ke S-GW adalah:

$$\begin{aligned}W_{\text{framePDN-GW}} &= W_{\text{datagram}} + \text{Header}_{GTP} + \text{Header}_{UDP} + \text{Header}_{IP} + \text{Header}_{Ethernet} + \text{FCS} \\ &= 2510 \text{ byte} + 8 \text{ byte} + 8 \text{ byte} + 40 \text{ byte} + 14 \text{ byte} + 4 \text{ byte} \\ &= 2584 \text{ byte}\end{aligned}$$

Sehingga diperoleh *delay* enkapsulasi pada PDN-GW sebesar:

$$\begin{aligned}t_{E(PDN-GW)} &= \frac{W_{\text{framePDN-GW}} \times 8}{C_{PDN-GW}} \\ &= \frac{2584 \text{ byte} \times 8}{10^8 \text{ bps}} \\ &= 2,067.10^{-4} \text{ s}\end{aligned}$$

Delay transmisi pada pengiriman paket pada proses *downlink* dari PDN-GW ke S-GW adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} t_{T(PDN-GW)} &= \frac{W_{framePDN-GW} \times 8}{C_{ethernet}} \\ &= \frac{2584 \text{ byte} \times 8}{10^9 \text{ bps}} \\ &= 2,067 \cdot 10^{-5} \text{ s} \end{aligned}$$

Sedangkan delay propagasi antara PDN-GW dan S-GW adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} t_{P(PDNGW-SGW)} &= \frac{N_{frameSGW} \times R}{v} \\ &= \frac{2 \times 4 \cdot 10^3}{3 \cdot 10^8 \text{ bps}} \\ &= 2,66 \cdot 10^{-5} \text{ s} \end{aligned}$$

Pada PDN-GW digunakan standar *Fast Ethernet* dengan kecepatan 100 Mbps dengan panjang data 2548 *byte*. Besar laju pelayanan paket data didapatkan sesuai dengan persamaan:

$$\begin{aligned} \mu_{PDN-GW} &= \frac{C_{PDN-GW}}{L} \\ &= \frac{10^8}{2584 \times 8} \\ &= 4837,5 \text{ paket/s} \end{aligned}$$

Laju kedatangan paket ( $\lambda$ ) sesuai dengan persamaan:

$$\begin{aligned} \lambda_{PDN-GW} &= \mu_{PDN-GW} \times \rho_{PDN-GW} \\ &= 4837,5 \times 0,1 \\ &= 483,75 \text{ paket/s} \end{aligned}$$

Delay antrian dapat ditentukan sesuai dengan persamaan:

$$\begin{aligned} t_{w1} &= \frac{\lambda_{PDN-GW}}{\mu_{PDN-GW} (\mu_{PDN-GW} - \lambda_{PDN-GW})} + \frac{1}{\mu_{PDN-GW}} \\ &= \frac{483,75}{4837,5(4837,5 - 483,75)} + \frac{1}{4837,5} \\ &= 2,296 \times 10^{-4} \text{ s} \end{aligned}$$

Dari perhitungan maka didapat *delay* total pada proses *downlink* pada pentransmisian dari PDN-GW ke SGW sebagai berikut:

$$\begin{aligned} t_{\text{net}}(\text{PDNGW-SGW}) &= t_D(\text{PDNGW}) + t_E(\text{PDNGW}) + t_T(\text{PDNGW-SGW}) + t_P(\text{PDNGW-SGW}) + t_W(\text{PDN-GW}) \\ &= 2,008.10^{-4} + 2,067.10^{-4} + 2,067.10^{-5} + 2,66.10^{-5} + 2,296.10^{-4} \\ &= 6,8437 \times 10^{-4} \text{ s} \end{aligned}$$

Paket yang diterima dari PDN-GW akan mengalami proses dekapsulasi dengan *delay* sebesar:

$$\begin{aligned} t_{D(\text{SGW})} &= \frac{W_{\text{datagram}} \times 8}{C_{\text{SGW}}} \\ &= \frac{2510 \text{ byte} \times 8}{10^8 \text{ bps}} \\ &= 2,008.10^{-4} \text{ s} \end{aligned}$$

Sehingga jumlah *frame* yang siap untuk ditransmisikan ke S-GW adalah:

$$\begin{aligned} W_{\text{frameS-GW}} &= W_{\text{datagram}} + \text{Header}_{\text{GTP}} + \text{Header}_{\text{UDP}} + \text{Header}_{\text{IP}} + \text{Header}_{\text{Ethernet}} \\ &= 2510 \text{ byte} + 8 \text{ byte} + 8 \text{ byte} + 40 \text{ byte} + 14 \text{ byte} \\ &= 2580 \text{ byte} \end{aligned}$$

Besar MSS dapat diperoleh sesuai dengan persamaan:

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

Selanjutnya, paket data yang melebihi MSS akan disegmentasi sesuai dengan persamaan berikut:

$$\begin{aligned} N_{\text{frameS-GW}} &= \frac{W_{\text{frameS-GW}}}{\text{MSS}} \\ &= \frac{2580 \text{ byte}}{1444 \text{ byte}} \\ &= 1,786 \end{aligned}$$

Sehingga didapat *delay* enkapsulasi pada S-GW adalah:

$$\begin{aligned} t_{E(\text{S-GW})} &= \frac{W_{\text{frameS-GW}} \times 8}{C_{\text{S-GW}}} \\ &= \frac{2580 \text{ byte} \times 8}{10^8 \text{ bps}} \\ &= 2,064.10^{-4} \text{ s} \end{aligned}$$

Hubungan antara S-GW dan MME menggunakan standar *Fast Ethernet* dengan kecepatan 100 Mbps. Sehingga nilai *delay* transmisi yang terjadi sesuai dengan persamaan:

$$\begin{aligned} t_{T(SGW-MME)} &= \frac{W_{frameSGW} \times 8}{C_{SGW-MME}} \\ &= \frac{2580 \text{ byte} \times 8}{10^8 \text{ bps}} \\ &= 2,064 \cdot 10^{-4} \text{ s} \end{aligned}$$

Hubungan antara SGW ke MME menggunakan fiber optik dengan jarak 1500 m. Nilai *delay* propagasi antara SGW dengan MME sesuai dengan persamaan:

$$\begin{aligned} t_{p-SGW} &= \frac{N_{frameSGW} \times R}{v} \\ &= \frac{2 \times 1,5 \cdot 10^3}{3 \cdot 10^8} \\ &= 1 \cdot 10^{-5} \text{ s} \end{aligned}$$

Pada S-GW digunakan standar *Fast Ethernet* dengan kecepatan 100 Mbps dengan panjang data 2580 *byte*. Besar laju pelayanan paket data didapatkan sesuai dengan persamaan berikut:

$$\begin{aligned} \mu_{S-GW} &= \frac{C_{S-GW}}{L} \\ &= \frac{10^8}{2580 \times 8} \\ &= 4844,9 \text{ paket/s} \end{aligned}$$

Laju kedatangan paket ( $\lambda$ ) sesuai dengan persamaan:

$$\begin{aligned} \lambda_{S-GW} &= \mu_{S-GW} \times \rho_{S-GW} \\ &= 4844,9 \times 0,1 \\ &= 484,49 \text{ paket/s} \end{aligned}$$

*Delay* antrian dapat ditentukan sesuai dengan persamaan:

$$\begin{aligned} t_{w2} &= \frac{\lambda_{S-GW}}{\mu_{S-GW} (\mu_{S-GW} - \lambda_{S-GW})} + \frac{1}{\mu_{S-GW}} \\ &= \frac{484,49}{4844,9(4844,9 - 484,49)} + \frac{1}{4844,9} \\ &= 2,293 \times 10^{-4} \text{ s} \end{aligned}$$

Dari perhitungan maka didapat *delay* total pada proses *downlink* pada pentransmisian dari SGW ke MME sebagai berikut:

$$\begin{aligned} t_{\text{net}}(\text{SGW-MME}) &= t_D(\text{SGW}) + t_E(\text{SGW}) + t_T(\text{SGW-MME}) + t_P(\text{SGW-MME}) + t_W(\text{SGW}) \\ &= 2,008.10^{-4} + 2,064.10^{-4} + 2,064.10^{-4} + 1.10^{-5} + 2,293.10^{-4} \\ &= 8,592 \times 10^{-4} \text{ s} \end{aligned}$$

Pada MME paket akan mengalami proses dekapsulasi dengan besar *delay* dekapsulasi sebagai berikut:

$$\begin{aligned} t_{D(\text{MME})} &= \frac{W_{\text{datagram}} \times 8}{C_{\text{MME}}} \\ &= \frac{2510 \text{ byte} \times 8}{10^8 \text{ bps}} \\ &= 2,008.10^{-4} \text{ s} \end{aligned}$$

Pada proses dekapsulasi, paket data MME didapatkan sesuai dengan persamaan berikut:

$$\begin{aligned} W_{\text{frameMME}} &= W_{\text{datagram}} + \text{Header}_{\text{IP}} + \text{Header}_{\text{UDP}} + \text{Header}_{\text{GTP}} \\ &= 2510 \text{ byte} + 40 \text{ byte} + 8 \text{ byte} + 8 \text{ byte} = 2566 \text{ byte} \end{aligned}$$

Sehingga pada MME akan terjadi *delay* enkapsulasi sebesar:

$$\begin{aligned} t_{E(\text{MME})} &= \frac{W_{\text{frameMME}} \times 8}{C_{\text{MME}}} \\ &= \frac{2566 \text{ byte} \times 8}{10^8 \text{ bps}} \\ &= 2,052.10^{-4} \text{ s} \end{aligned}$$

Antara MME dan *eNodeB* terjadi *delay* transmisi sebesar:

$$\begin{aligned} t_{T(\text{MME-SGSN})} &= \frac{W_{\text{frameMME}} \times 8}{C_{\text{MME}}} \\ &= \frac{2566 \text{ byte} \times 8}{10^8 \text{ bps}} \\ &= 2,052.10^{-4} \text{ s} \end{aligned}$$

Pada MME dan *eNodeB* menggunakan media udara dengan jarak 1500 m. Nilai *delay* propagasi antara MME dan *eNodeB* didapat dengan perhitungan sebagai berikut:

$$t_{P(\text{MME-SGW})} = \frac{N_{\text{frame}} \times R}{v}$$

$$= \frac{2 \times 1500}{3.10^8 \text{ bps}}$$

$$= 1.10^{-5} \text{ s}$$

Pada MME menggunakan teknologi *Fast Ethernet* dengan transmisi data sebesar 100Mbps dan panjang data 2566byte, maka dapat ditentukan laju pelayanan paket sebesar:

$$\mu_{MME} = \frac{C_{MME}}{L}$$

$$= \frac{10^8}{2566 \times 8}$$

$$= 4871 \text{ paket/s}$$

Dalam analisis ini diasumsikan bahwa faktor utilisasi berubah dari 0,1 sampai 0,9 dengan kenaikan 0,1. Laju kedatangan paket pada MME adalah sebagai berikut:

$$\lambda_{MME} = \mu_{MME} \times \rho_{MME}$$

$$= 4871 \times 0,1$$

$$= 487,1 \text{ paket/s}$$

Sehingga *delay* antrian pada MME adalah sebagai berikut:

$$t_{w3} = \frac{\lambda_{MME}}{\mu_{MME}(\mu_{MME} - \lambda_{MME})} + \frac{1}{\mu_{MME}}$$

$$= \frac{487,1}{4871(4871 - 487,1)} + \frac{1}{4871}$$

$$= 2,28 \times 10^{-4} \text{ s}$$

Sehingga pada proses pentransmisi data dari MME dan SGSN dapat diketahui *delay* proses totalnya adalah sebagai berikut:

$$t_{\text{net}}(\text{MME} - \text{eNodeB}) = t_D(\text{MME}) + t_E(\text{MME}) + t_T(\text{MME} - \text{eNodeB}) + t_P(\text{MME} - \text{eNodeB}) + t_w(\text{MME})$$

$$= 2,008.10^{-4} + 2,052.10^{-4} + 2,052.10^{-4} + 1.10^{-5} + 2,28.10^{-4}$$

$$= 8,492 \times 10^{-4} \text{ s}$$

Pada *eNodeB*, paket data didekapsulasi dengan *delay* dekapsulasi sebagai berikut:

$$t_{D(\text{eNodeB})} = \frac{W_{\text{datagram}} \times 8}{C_{\text{eNodeB}}}$$

$$= \frac{2510 \text{ byte} \times 8}{155,52.10^6 \text{ bps}}$$

$$= 1,291.10^{-4} \text{ s}$$

Pada *eNodeB*, *frame* akan disegmentasi menjadi PDCP data PDU (*Protocol Data Unit*) dengan menambahkan *header* PDU *type* sebesar 3bit dan PID (*Paket Identifier*) sebesar 5bit, jadi total ada 8bit atau 1byte. (3GPP TS 22.323 Rel.5).

$$\begin{aligned} W_{framePDCP} &= W_{datagram} + Header_{PDCP} \\ &= 2510byte + 1byte \\ &= 2511byte \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} N_{frameRLC} &= \frac{W_{framePDCP}}{40byte} \\ &= \frac{2511byte}{40byte} \\ &= 62,7 \end{aligned}$$

Kemudian *frame* RLC dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$\begin{aligned} W_{frameRLC} &= 40byte + Header_{RLC} \\ &= 40byte + 2byte \\ &= 42 byte \end{aligned}$$

Jumlah total *frame* RLC PDU yang dikirimkan ke MAC adalah:

$$\begin{aligned} W_{frameRLCtotal} &= N_{frameRLC} \times W_{frameRLC} \\ &= 62,7 \times 42byte \\ &= 2633,4 byte \end{aligned}$$

Pada *layer* MAC, RLC PDU akan disegmentasi menjadi MAC SDU (*Service Data Unit*) sebesar 42byte. Sehingga jumlah *frame* MAC SDU adalah:

$$\begin{aligned} N_{frameMAC} &= \frac{W_{frameRLCtotal}}{42byte} \\ &= \frac{2633,4byte}{42byte} \\ &= 62,7 \end{aligned}$$

Kemudian *frame* MAC dapat dihitung dengan persamaan:

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

Sehingga jumlah *frame* RAN yang siap dikirimkan ke UE sama dengan jumlah *frame* MAC, yaitu:

$$\begin{aligned} W_{\text{frame eNodeB}} &= W_{\text{frame MAC total}} = N_{\text{frame MAC}} \times W_{\text{frame MAC}} \\ &= 62,7 \times 45 \text{ byte} \\ &= 2821,5 \text{ byte} \end{aligned}$$

Nilai *delay* enkapsulasi pada RAN yang terjadi didapatkan dengan proses sebagai berikut:

$$\begin{aligned} t_{E(eNodeB)} &= \frac{W_{\text{frameRAN}} \times 8}{C_{eNodeB}} \\ &= \frac{2821,5 \text{ byte} \times 8}{155,52 \times 10^6 \text{ bps}} \\ &= 1,451 \times 10^{-4} \text{ s} \end{aligned}$$

*Delay* transmisi pada pengiriman paket dari *NodeB* ke UE melalui *LTE-Uu.Interface* dengan kecepatan 3,6Mbps untuk paket data 2821,5byte adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} t_{T(LTE-UuInterface)} &= \frac{W_{\text{frameMACtotal}} \times 8}{n \times C_{MT}} \\ &= \frac{2821,5 \text{ byte} \times 8}{15 \times 3,6 \times 10^6 \text{ bps}} \\ &= 4,18 \times 10^{-4} \text{ s} \end{aligned}$$

Dengan *delay* propagasi sebesar:

$$\begin{aligned} t_{p(eNodeB-UE)} &= \frac{N_{\text{frameRLC}} \times R}{v} \\ &= \frac{62,7 \text{ byte} \times 1000}{3 \times 10^8} \\ &= 2,09 \times 10^{-4} \text{ s} \end{aligned}$$

Pada *eNodeB interface* sistem transmisi STM-1 yang memberikan kecepatan data sebesar 155,52 Mbps dengan panjang data 2821,5 byte. Besar laju pelayanan paket data didapatkan sesuai dengan persamaan berikut:

$$\mu_{eNodeB} = \frac{C_{eNodeB}}{L}$$

$$= \frac{155,52 \cdot 10^6}{2821,5 \times 8}$$

$$= 6889,9 \text{ paket/s}$$

Laju kedatangan paket ( $\lambda$ ) sesuai dengan persamaan:

$$\lambda_{eNodeB} = \mu_{eNodeB} \times \rho_{eNodeB}$$

$$= 6889,9 \times 0,1$$

$$= 688,99 \text{ paket/s}$$

Delay antrian dapat ditentukan sesuai dengan persamaan:

$$t_{w3} = \frac{\lambda_{eNodeB}}{\mu_{eNodeB}(\mu_{eNodeB} - \lambda_{eNodeB})} + \frac{1}{\mu_{eNodeB}}$$

$$= \frac{688,99}{6889,9(6889,9 - 688,99)} + \frac{1}{6889,9}$$

$$= 1,613 \times 10^{-4} \text{ s}$$

Dari perhitungan maka didapat *delay* total pada proses *downlink* pada pentransmisian dari *eNodeB* ke UE sesuai persamaan berikut:

$$t_{\text{net}}(eNodeB-UE) = t_D(eNodeB) + t_E(eNodeB) + t_{T(LTE,Uu-Interface)} + t_p(eNodeB-UE) + t_w(eNodeB)$$

$$= 1,291 \cdot 10^{-4} + 1,451 \cdot 10^{-4} + 4,18 \cdot 10^{-2} + 2,09 \cdot 10^{-4} + 1,614 \cdot 10^{-4}$$

$$= 4,244 \times 10^{-2} \text{ s}$$

Berdasarkan perhitungan *delay handover* pada jaringan LTE dan UMTS di atas, maka dapat diperoleh kebutuhan *delay* untuk proses *handover* dari LTE ke UMTS dengan faktor utilisasi 0,1 yang ditunjukkan pada Tabel 4.14 berikut ini:

**Tabel 4.14** Hasil Perhitungan *Delay Handover* untuk Faktor Utilisasi 0,1

| No  | Spesifikasi                                            | Arah Pentransmisi | Kebutuhan <i>Delay</i> (s) |
|-----|--------------------------------------------------------|-------------------|----------------------------|
| 1.  | <i>Radio quality report</i>                            | UE – eNodeB       | $6,272.10^{-3}$            |
| 2.  | <i>Handover required</i>                               | eNodeB – MME      | $6,228.10^{-4}$            |
| 3.  | <i>Forward relocation request</i>                      | MME – SGSN        | $8,592.10^{-4}$            |
| 4.  | <i>Relocation request</i>                              | SGSN – RNC        | $1,5747.10^{-3}$           |
| 5.  | <i>Relocation response</i>                             | RNC – SGSN        | $1,46.10^{-3}$             |
| 6.  | <i>Forward relocation response</i>                     | SGSN – MME        | $7,8654.10^{-4}$           |
| 7.  | <i>Create indirect data forwarding tunnel request</i>  | MME – SGW         | $8,492.10^{-4}$            |
| 8.  | <i>Create indirect data forwarding tunnel response</i> | SGW – MME         | $8,592.10^{-4}$            |
| 9.  | <i>Handover command</i>                                | MME – eNodeB      | $8,492.10^{-4}$            |
| 10. | <i>Handover from LTE command</i>                       | eNodeB – UE       | $4,244.10^{-2}$            |
| 11. | <i>Handover to 3G completed</i>                        | UE – RNC          | $7,239.10^{-2}$            |
| 12. | <i>Relocation complete</i>                             | RNC – SGSN        | $1,46.10^{-3}$             |
| 13. | <i>Forwarding relocation complete</i>                  | SGSN – MME        | $7,8654.10^{-4}$           |
| 14. | <i>Forwarding relocation complete Ack.</i>             | MME – SGSN        | $8,592.10^{-4}$            |
| 15. | <i>Modify bearer request</i>                           | SGSN – SGW        | $1,636.10^{-3}$            |
| 16. | <i>Modify bearer response</i>                          | SGW – SGSN        | $1,712.10^{-3}$            |
| 17. | <i>Release resource request</i>                        | MME – eNodeB      | $8,492.10^{-2}$            |
|     | <i>Delay Handover Total</i>                            |                   | 0,158128                   |

Sumber: Perhitungan, 2012

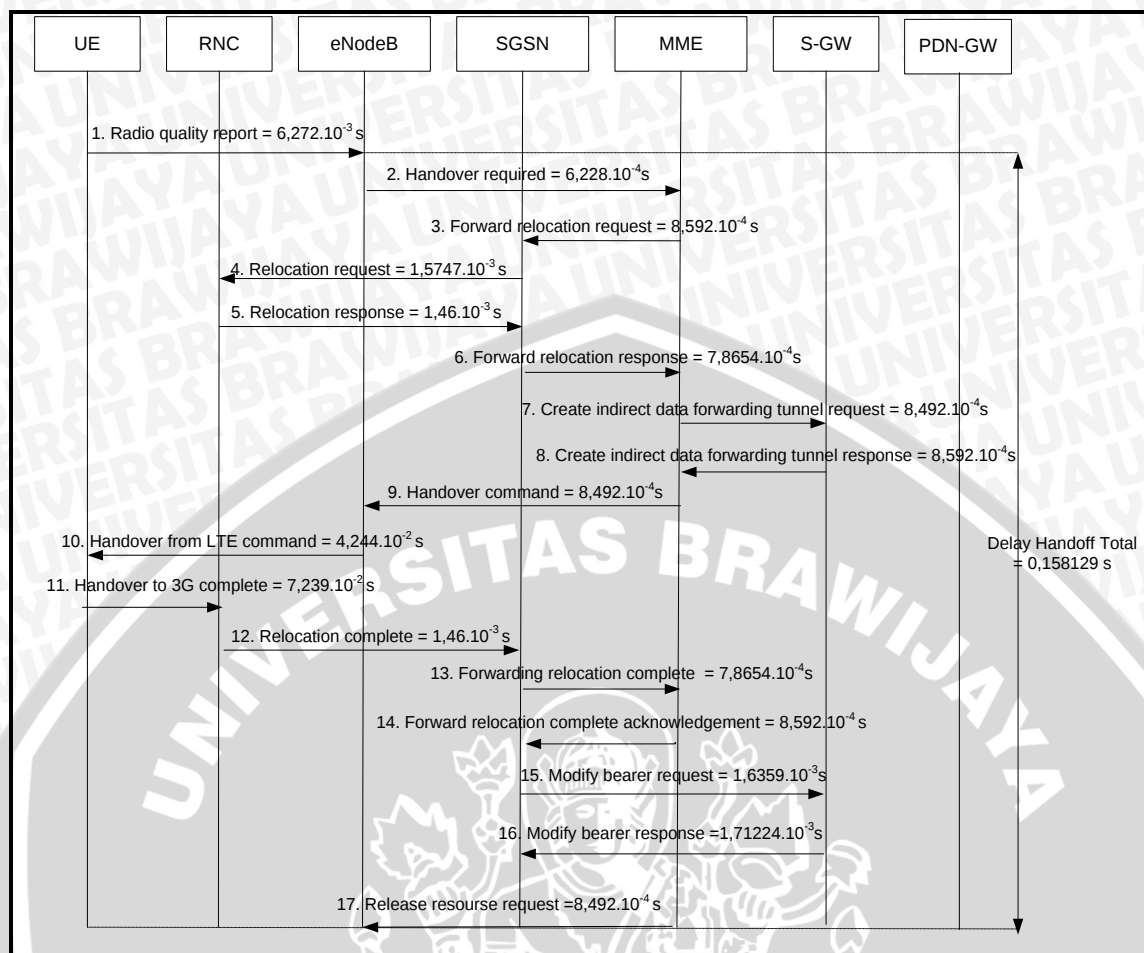
Dengan cara yang sama, maka didapatkan *delay handover* total menggunakan faktor utilisasi 0,1 sampai 0,9. Tabel 4.15 menunjukkan hasil perhitungan *delay handover* total tersebut.

**Tabel 4.15** Hasil Perhitungan *Delay Handover* dengan Faktor Utilisasi 0,1 sampai 0,9

| No. | Faktor Utilisasi | Delay Total (s) |
|-----|------------------|-----------------|
| 1.  | 0,1              | 0,158127936     |
| 2.  | 0,2              | 0,158657114     |
| 3.  | 0,3              | 0,159331315     |
| 4.  | 0,4              | 0,160230244     |
| 5.  | 0,5              | 0,161488749     |
| 6.  | 0,6              | 0,16337651      |
| 7.  | 0,7              | 0,166522771     |
| 8.  | 0,8              | 0,172815292     |
| 9.  | 0,9              | 0,191692877     |

(Sumber: Hasil Perhitungan)

*Delay handover* pada prosedur proses *handover* dari LTE ke UMTS dengan faktor utilisasi 0,1 ditunjukkan pada Gambar 4.11 :



**Gambar 4.11** Delay Handover pada Prosedur Pensinyalan Handover dari LTE ke UMTS  
**Sumber:** Analisis, 2012

Berdasarkan perhitungan *delay handover* pada jaringan LTE dan UMTS di atas, maka didapat *delay* proses total sebesar  $6,2583.10^{-2}$  s, *delay* transmisi total sebesar  $8,253.10^{-2}$  s, *delay* propagasi total sebesar  $3,36.10^{-3}$  s, serta *delay* antrian total dengan faktor utilisasi 0,1 sampai 0,9 yang terjadi saat proses *handover* sebagai berikut:

**Tabel 4.16** Hasil Perhitungan Delay Antrian Total dengan Pengaruh Handover

| Faktor Utilisasi | Delay Antrian Total (s) |
|------------------|-------------------------|
| 0,1              | 0,002358946             |
| 0,2              | 0,002653813             |
| 0,3              | 0,003032929             |
| 0,4              | 0,003538417             |
| 0,5              | 0,004246101             |
| 0,6              | 0,005307626             |
| 0,7              | 0,007076836             |
| 0,8              | 0,010615253             |
| 0,9              | 0,021230506             |

Sumber: Perhitungan, 2012

Perhitungan selanjutnya setelah didapatkan *delay handover* adalah perhitungan pengaruh *delay handover* terhadap perubahan *throughput* jaringan. Berdasarkan hasil analisis *delay* antrian total jaringan UMTS pada Tabel 4.13 maka proses perhitungan dapat dijelaskan sebagai berikut:

Dalam proses *handover*, proses pentransmisian data akan mengalami perpindahan dari jaringan LTE dengan *throughput*  $3,53595 \cdot 10^6$  bps, ke jaringan UMTS dengan *throughput*  $3,44655 \cdot 10^5$  bps. Pengaruh *delay handover* pada *throughput* di jaringan UMTS dengan faktor utilisasi 0,1 sampai 0,9 dapat dianalisis dengan perhitungan berikut ini.

Pada jaringan UMTS diketahui bahwa probabilitas *blocking* sebesar  $10^{-7}$  (IMT-2000). Maka besarnya probabilitas *packet loss* untuk data *video streaming* yang terjadi adalah:

$$\begin{aligned}\rho_{vs} &= P_{vs \text{ size}} \times \rho_b \\ &= 2510 \times 8 \times 10^{-7} \\ &= 2,008 \cdot 10^{-3}\end{aligned}$$

Probabilitas *packet loss* pada jaringan UMTS dihitung dari probabilitas *packet loss* pada UMTS *air interface*, RAN (Node B dan RNC), *core network* (GGSN dan SGSN), dan *server* sesuai persamaan:

$$\begin{aligned}\rho_{\text{server}} &= (l-l') \rho_b \\ &= 2552 \times 8 \times 10^{-7} \\ &= 2,0416 \times 10^{-3}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\rho_{\text{GGSN}} &= (l-l') \rho_b \\ &= 2584 \times 8 \times 10^{-7} \\ &= 2,0672 \times 10^{-3}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\rho_{\text{SGSN}} &= (l-l') \rho_b \\ &= 2893,8 \times 8 \times 10^{-7} \\ &= 2,315 \times 10^{-3}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\rho_{\text{RAN}} &= (l-l') \rho_b \\ &= 3009,6 \times 8 \times 10^{-7} \\ &= 2,408 \times 10^{-3}\end{aligned}$$

Standar nilai BER dalam jaringan UMTS diketahui sebesar  $10^{-6}$  (IMT-2000), maka dapat diperoleh besarnya probabilitas *frame error* pada *air interface* sesuai persamaan berikut:

$$\begin{aligned}\rho_{\text{AI}} &= 1 - (1 - P_e)^{l+l'} \\ &= 1 - (1 - 10^{-6})^{2961 \times 8} \\ &= 1 - (1 - 10^{-6})^{23688} = 0,0234\end{aligned}$$

Sehingga dengan persamaan (2.79) dapat diperoleh probabilitas *packet loss* pada jaringan UMTS.

$$\begin{aligned}\rho_{net\ UMTS} &= 1 - [(1 - \rho_{AI})(1 - \rho_{RNC})^h(1 - \rho_{SGSN})(1 - \rho_{GGSN})(1 - \rho_{server})] \\ &= 1 - [(1 - 0,0234)(1 - 2,408 \cdot 10^{-3})^2(1 - 2,315 \cdot 10^{-3}) \\ &\quad (1 - 2,0672 \cdot 10^{-3})(1 - 2,0416 \cdot 10^{-3})] \\ &= 0,0406\end{aligned}$$

Probabilitas *packet loss* total pada jaringan UMTS dapat dihitung dengan persamaan:

$$\begin{aligned}\rho_{tot\ UMTS} &= 1 - (1 - \rho_{net\ UMTS})(1 - \rho_{mobile\ tv}) \\ &= 1 - (1 - 0,0406)(1 - 2,008 \cdot 10^{-3}) \\ &= 0,0425\end{aligned}$$

Waktu yang dibutuhkan untuk pentransmisian satu *frame* ditentukan melalui persamaan berikut:

$$\begin{aligned}t_1 &= \frac{(Pl_{frame} + H_{frame}) \times 8}{C_{trans}} \\ &= \frac{2961 \times 8}{384 \times 10^3} = 0,0617s\end{aligned}$$

*Delay* propagasi total dan *delay* proses total untuk satu *frame* dapat dihitung dengan persamaan:

$$\begin{aligned}t_p &= \frac{t_{p(UMTS)}}{N_{frame}} \\ &= \frac{2,91 \times 10^{-3}}{62,7} \\ &= 4,641 \cdot 10^{-5} s \\ t_{proc} &= \frac{t_{proc}}{N_{frame}} + \frac{t_{Wtotal}}{N_{frame}} \\ &= \left( \frac{5,5513 \cdot 10^2}{62,7} + \frac{1,3704 \cdot 10^3}{62,7} \right) s \\ &= 0,90723 \cdot 10^{-3} s\end{aligned}$$

*Fixed timeout interval* dapat diperoleh sesuai dengan persamaan berikut:

$$\begin{aligned}t_{out} &= 2t_p + 2t_I + t_{proc} \\ &= (2 \times 4,641 \cdot 10^{-5}) + (2 \times 0,0617) + (0,90723 \cdot 10^{-3}) \\ &= 0,1244 s\end{aligned}$$

Maka konstanta  $\alpha$  dapat diperoleh sesuai dengan persamaan berikut:

$$\alpha = 1 + \frac{t_{out}}{t_I}$$

$$= 1 + \frac{0,1244}{0,0617} = 3,0162$$

Sehingga diperoleh besarnya *throughput* pada jaringan UMTS dengan faktor utilisasi 0,1 untuk paket data 2502 *byte* adalah :

$$\lambda = \frac{(1 - \rho_{tot})}{t_I [1 + \alpha - 1 \rho_{tot}]}$$

$$= \frac{(1 - 0,05613)}{0,0617 [1 + 3,0162 - 1 \cdot 0,05613]}$$

$$= 14,29381 \text{ paket/s}$$

$$= 14,29381 \times 2961 \times 8 \text{ bps}$$

$$= 3,38591 \times 10^5 \text{ bps}$$

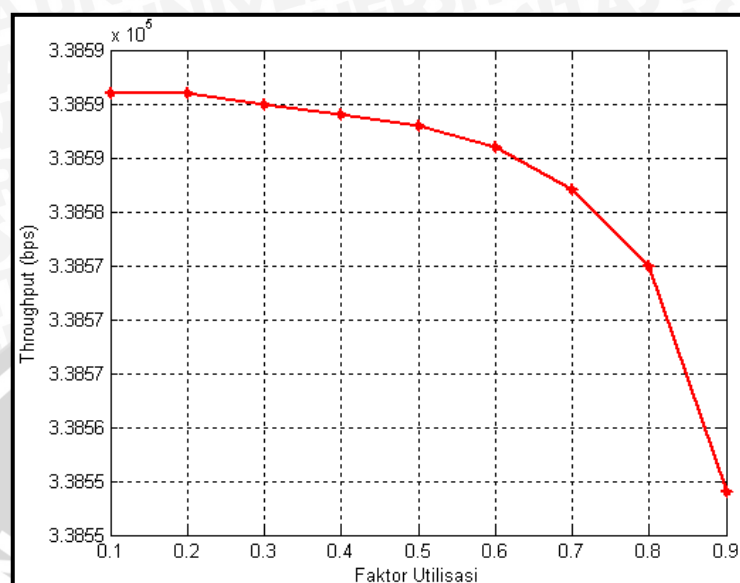
Dengan cara yang sama diperoleh nilai *throughput* pada jaringan UMTS dengan faktor utilisasi ( $\rho$ ) sebesar 0,2 hingga 0,9 seperti pada Tabel berikut:

**Tabel 4.17** Hasil Analisis *throughput* pada jaringan UMTS karena pengaruh *handover* dengan Perubahan Faktor Utilisasi

| No. | Faktor Utilisasi | <i>Throughput</i> (s) |
|-----|------------------|-----------------------|
| 1.  | 0,1              | $3,38591 \cdot 10^5$  |
| 2.  | 0,2              | $3,38591 \cdot 10^5$  |
| 3.  | 0,3              | $3,38590 \cdot 10^5$  |
| 4.  | 0,4              | $3,38589 \cdot 10^5$  |
| 5.  | 0,5              | $3,38588 \cdot 10^5$  |
| 6.  | 0,6              | $3,38586 \cdot 10^5$  |
| 7.  | 0,7              | $3,38582 \cdot 10^5$  |
| 8.  | 0,8              | $3,38575 \cdot 10^5$  |
| 9.  | 0,9              | $3,38554 \cdot 10^5$  |

(Sumber: Hasil Perhitungan)

Berdasarkan tabel 4.17, maka didapatkan grafik perbandingan nilai *throughput* pada jaringan UMTS dengan faktor utilisasi 0,1 sampai 0,9, yang ditunjukkan pada Gambar 4.12.



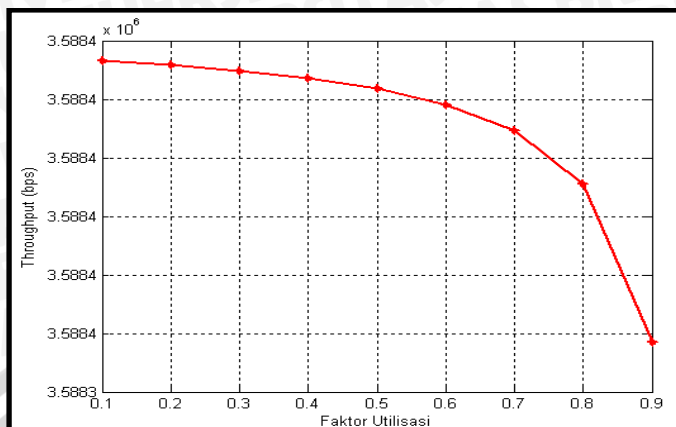
**Gambar 4.12** Grafik Hubungan *Throughput* Jaringan UMTS dengan Pengaruh *Handover* terhadap Faktor Utilisasi  
Sumber: Analisis, 2012

Berdasarkan analisis yang dilakukan secara matematis maupun grafis dapat dijelaskan bahwa pada pengiriman data dari *Server* ke UE melalui jaringan UMTS pada saat terjadi *handover* menunjukkan bahwa nilai *throughput* dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain besar data yang dikirimkan, *delay* yang terjadi saat *handover* berlangsung sesuai dengan prosedur pensinyalan *handover* dari LTE ke UMTS (*delay* enkapsulasi dan dekapsulasi, *delay* antrian, serta *delay* transmisi), faktor utilisasi, dan *packet loss*.

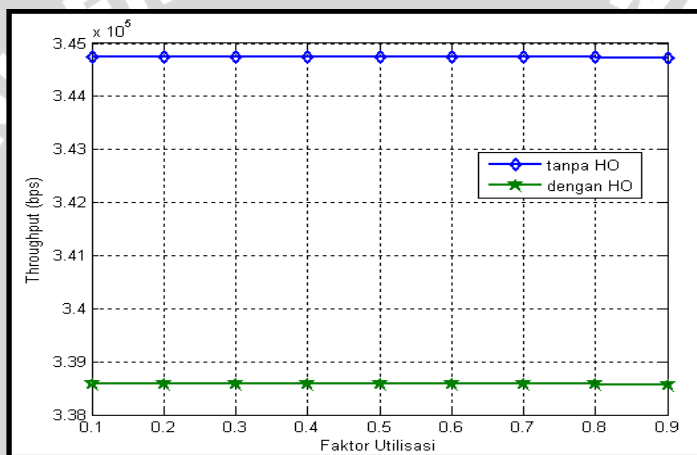
Nilai *throughput* pada jaringan UMTS dengan pengaruh *handover* akan semakin kecil dengan bertambahnya faktor utilisasi. Akan tetapi karena perubahan yang terjadi relatif kecil, pada analisis grafis perubahan *throughput* terlihat tidak begitu jelas.

Berdasarkan Tabel 4.17 dan 4.12-4.13, maka didapatkan grafik perbandingan nilai *throughput* dan berdasarkan Tabel 4.15 dan 4.7-4.8 didapatkan grafik perbandingan nilai *delay* pada jaringan UMTS dan LTE yang tidak dipengaruhi oleh proses *handover* dengan *throughput* akibat pengaruh proses *handover* dari LTE ke

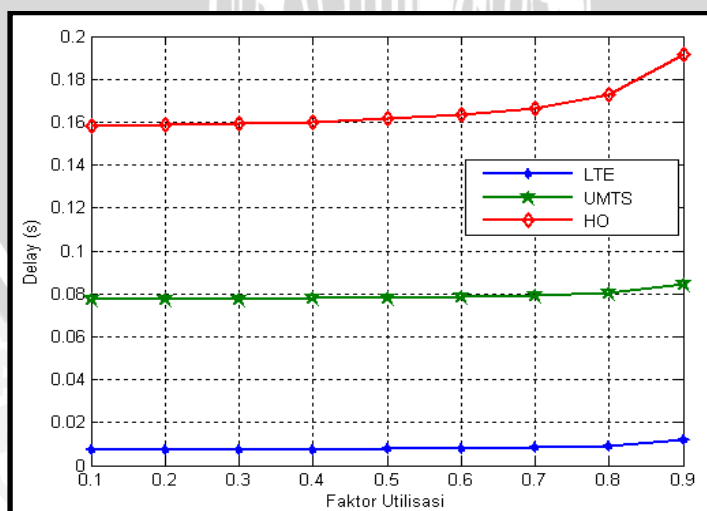
UMTS, dengan faktor utilisasi 0,1 sampai 0,9, yang ditunjukkan pada Gambar 4.13 sampai Gambar 4.15.



**Gambar 4.13** Grafik Hubungan *Throughput* Jaringan LTE tanpa *Handover* terhadap Faktor Utilisasi  
Sumber: Analisis, 2012



**Gambar 4.14** Grafik Perbandingan *Throughput* Jaringan UMTS dengan Pengaruh *Handover* dan Tanpa Pengaruh *Handover* terhadap Faktor Utilisasi  
Sumber: Analisis, 2012



**Gambar 4.15** Grafik Perbandingan *Delay* Jaringan dengan Pengaruh *Handover* dan Tanpa Pengaruh *Handover* terhadap Faktor Utilisasi  
Sumber: Analisis, 2012

Berdasarkan analisis baik secara matematis maupun secara grafis, maka dapat dijelaskan bahwa:

- Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai *delay handover* menuju jaringan UMTS terbesar terjadi pada faktor utilisasi 0,9 yaitu sebesar 0,19169s. Sedangkan nilai *delay handover* terkecil terdapat pada faktor utilisasi 0,1 yaitu 0,15813s.
- Berdasarkan analisis pada proses *handover* dari LTE ke UMTS dengan menggunakan faktor utilisasi dari 0,1 sampai 0,9 dapat ditarik kesimpulan bahwa dengan kenaikan *delay* jaringan karena pengaruh *handover* penerapan aplikasi video *streaming* masih memenuhi standar, karena *delay* yang terjadi tidak lebih besar dari *delay* toleransi untuk layanan video *streaming* yaitu  $<10s$ .
- Berdasarkan perhitungan dan analisa grafik pada Gambar 4.14 menunjukkan adanya penurunan yang signifikan pada nilai *throughput* di jaringan UMTS sebagai pengaruh *delay handover* selama terjadinya proses *handover* dari jaringan LTE ke UMTS.

