

ANALISIS KINERJA TCP WESTWOOD PLUS UNTUK PENCEGAHAN KONGESTI PADA JARINGAN LTE MENGGUNAKAN NETWORK SIMULATOR 3 (NS 3)

Isti Dwi Hemawati^{*}), Sukiswo, and Ajub Ajulian Zahra

Departemen Teknik Elektro, Universitas Diponegoro, Semarang
Jl. Prof. Sudharto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang 50275, Indonesia

^{*}E-mail: istidh33@gmail.com

Abstrak

LTE (Long Term Evolution) merupakan pengembangan teknologi terbaru dibidang jaringan seluler dimana semua interface berbasis full IP oleh 3GPP. Arsitektur LTE dirancang untuk mendukung jaringan packet switching berbasis TCP/IP dengan mobilitas tinggi, QoS (Quality of Service), dan latency yang kecil. Layer TCP memiliki fungsi sebagai flow control dan error control. Fungsi flow control berkaitan dengan pengiriman data agar tidak terjadi flooding sehingga dilakukan mekanisme pengendalian kongesti ditempuh dengan pengembangan berbagai jenis algoritma TCP. Salah satunya algoritma AIAD (Additive Increase Adaptive Decrease) pada TCP Westwood Plus. Berdasarkan hasil simulasi didapatkan throughput rata-rata jumlah user 20 UE paling tinggi sebesar 34,076 Mbps dengan indeks fairness sistem keseluruhan paling rendah bernilai 0,964323781. Sedangkan untuk jumlah user 6 UE memiliki throughput yang rendah sebesar 33,772 Mbps tetapi indeks fairness yang lebih tinggi bernilai 0,964328776 sehingga tingkat keadilan sangat baik. Pada analisis delay end-to-end didapatkan untuk topologi 1 eNodeB 6 UE 2,0236 ms dan 1 eNodeB 10 UE 2,0234 ms. Sedangkan topologi 2 eNodeB 6 UE 2,0373 ms dan 2 eNodeB 10 UE 2,3044 ms. Pada analisis perbandingan kongesti window topologi 1 eNodeB variasi jumlah user 10 UE memiliki ukuran window rata-rata paling tinggi dibandingkan dengan 2 variasi jumlah user lainnya.

Kata kunci: LTE, TCP, Westwood Plus, congestion control

Abstract

LTE (Long Term Evolution) is the newest technology development in the field of cellular network based on full IP developed by 3GPP. It is designed to support packet switching network based on TCP/IP with high mobility, QoS (Quality of Service), and small latency. TCP layer functioning as the flow control and error control. Flow control function is associated with data transmission to avoid any flooding; therefore, the congestion control mechanism is done through the development of various types of TCP algorithm. Such as AIAD (Additive Increase Adaptive Decrease) algorithm in TCP Westwood plus. According to the simulation result, the average throughput of user amount 20 UE obtains a maximum number of 34.076 Mbps with the lowest number of overall index fairness system of 0.964323781. Then, the user amount 6 UE has a low throughput of 33.772 Mbps with higher fairness index of 0.964328776, an excellent fairness index. In the end-to-end delay analysis, the average topological delay is obtained at 2.0236 ms for 1 eNodeB 6 UE and 2.0234 ms for 1 eNodeB 10 UE. Meanwhile, the topology 2 eNodeB 6 UE is obtained at 2.0373 ms and 2 eNodeB 10 UE at 2.3044 ms. In the analysis of congestion comparison of the topology window 1 eNodeB, the variation of user amount 10 UE has the highest average size compared to the 2 variation of the other user amounts.

Keywords: LTE, TCP, Westwood Plus, congestion control

1. Pendahuluan

LTE (*Long Term Evolution*) yaitu sebuah teknologi berbasis full IP dari proyek 3GPP (*Third Generation Partnership Project*) yang memperbaiki standar jaringan *mobile* generasi sebelumnya. Saat ini perkembangan teknologi LTE yang dirilis 3GPP pada bulan Juni 2013

telah mencapai tahap lanjut *Release 10* yang lebih dikenal sebagai *LTE-Advanced* yaitu perbaikan dari *Release 8*. *LTE-Advanced* ini memiliki kecepatan transfer data mencapai 3Gbps di sisi *downlink* dan 1.5Gbps untuk *uplink*. Hal ini disebabkan pada sistem transmisi arah *downlink* telah menggunakan OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) dan di sisi *uplink* juga telah menggunakan SC-FDMA (*Single Carrier-*

Frequency Division Multiple Access). Arsitektur jaringan LTE dirancang untuk mendukung jaringan *packet switching* dengan mobilitas tinggi, QoS (Quality of Service), dan *latency* yang kecil. Jaringan *packet switching* juga dapat digunakan untuk melayani semua jenis aplikasi layanan termasuk *voice* atau telepon menggunakan koneksi paket internet di mana pada generasi sebelumnya untuk layanan telepon dilayani dengan jaringan *circuit switching*. Sehingga LTE mampu mendukung semua kebutuhan baik berupa *voice*, data, video maupun IP TV.

Packet switching sendiri juga digunakan untuk melayani salah satu aplikasi jaringan berbasis TCP/IP. Pada layer OSI (Open System Interconnection), TCP/IP terletak pada layer 4 (layer TCP). Layer TCP memiliki fungsi sebagai *flow control* dan *error control*. Fungsi *flow control* berkaitan dengan pengiriman data agar tidak terjadi *flooding*. Mekanisme pengendalian kongesti ditempuh dengan pengembangan berbagai jenis algoritma TCP. Salah satunya algoritma pada TCP *Westwood+* yaitu AIAD (Additive Increase Adaptive Decrease). TCP *Westwood+* merupakan hasil evolusi dari TCP *Westwood*. TCP *Westwood+* adalah salah satu jenis TCP yang telah mengalami tahap perkembangan hasil modifikasi dari TCP *Reno* atau *New Reno* di sisi penerima yang mengoptimalkan kinerja dari TCP untuk pencegahan kongesti baik di jaringan *wired* maupun *wireless*.

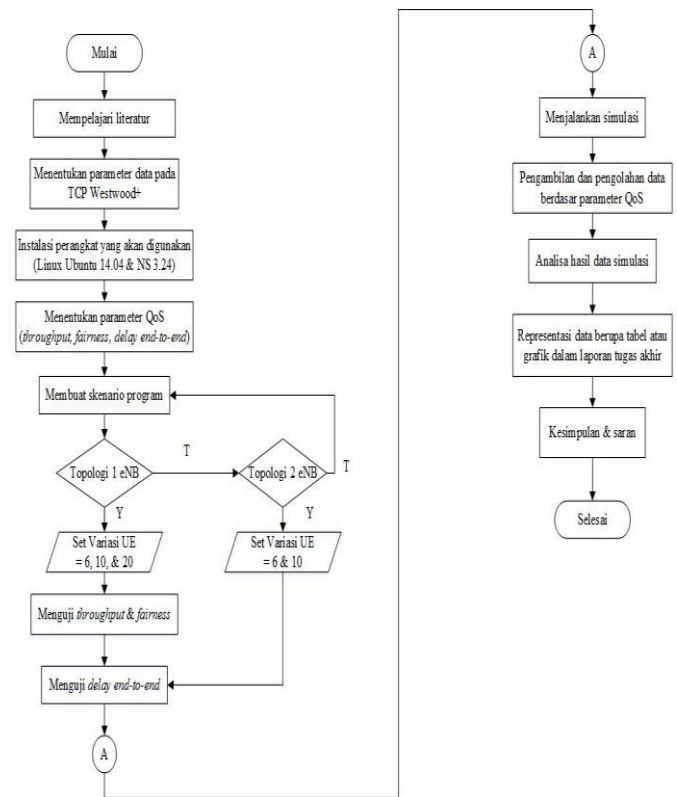
Pada penelitian sebelumnya, telah diimplementasikan TCP *Westwood* pada jaringan LTE namun menggunakan NS2 [1]. Terdapat pula penelitian tentang perbaikan TCP *Westwood+* dengan perangkat lunak NS2 [2] dan NS3 [3] namun tidak dalam jaringan LTE. Selain itu, telah dilakukan penelitian tentang kinerja TCP *Westwood+* dalam penanganan kongesti [4] dan peningkatan TCP *congestion window* melalui jaringan LTE-Advanced [5].

2. Metode

Pada penelitian ini akan membuat simulasi jaringan LTE yang akan diimplementasikan di perangkat lunak *Network Simulator 3* versi 3.24. Seluruh simulasi yang dibuat digunakan untuk menganalisis tiga pembahasan utama yaitu *throughput*, *fairness*, dan juga *delay end-to-end*. *Node-node* akan difungsikan sebagai UE (*user equipment*), eNodeB, P-GW dan *server*.

Terdapat 2 skenario utama, yaitu skenario pengujian *throughput* dan *fairness* dan skenario pengujian *delay end-to-end*. Pada skenario pengujian *throughput* dan *fairness* digunakan topologi 1 eNodeB dengan jumlah *user* yang divariasikan sebanyak 6 UE, 10 UE, dan 20 UE. Sedangkan untuk skenario pengujian *delay end-to-end* digunakan topologi 1 eNodeB dan 2 eNode B dengan jumlah *user* yang divariasikan sebanyak 6 UE, dan 10 UE.

Adapun flowchart metodologi penelitian secara keseluruhan dapat dilihat seperti pada gambar 1.



Gambar 1. Flowchart metodologi penelitian

Adapun parameter yang digunakan untuk pengujian *throughput* dan *fairness* dengan topologi yang dipakai yaitu 1 eNodeB dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. Parameter pengujian *throughput* dan *fairness*

Parameter	Nilai
Teknologi Akses	
• DL	OFDMA
• UL	SC-FDMA
Skema antena	MIMO
Model Antena	Isotropic
Model Propagasi	Okumura-Hatta
Jumlah node user	6, 10, 20
Dimensi Topografi	200 x 200 (m ²)
Skema modulasi	Adaptif (QPSK, 16 QAM, 64 QAM)
Mode Radio Akses	FDD
Channel Bandwidth	5 MHz
Loss Rate	10 ⁻⁶
Delay transmisi	2 ms
Ukuran window	65535
Jenis Trafik	Bulk Send Application
Algoritma Kontrol Kongesti	Westwood+
Durasi simulasi	300 s
Variasi topologi	1 eNodeB

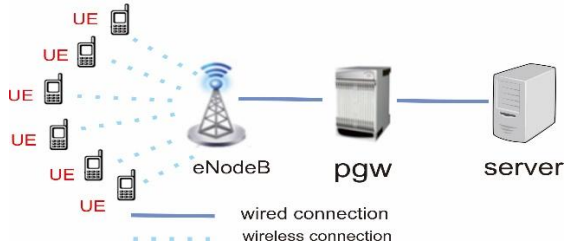
Selain itu, parameter yang digunakan untuk pengujian *delay end-to-end* dengan topologi yang dipakai yaitu 1 eNodeB dan 2 eNodeB dapat dilihat pada tabel 2.

Tabel 2. Parameter pengujian *delay end-to-end*

Parameter	Nilai
Teknologi Akses	
• DL	OFDMA
• UL	SC-FDMA
Skema antena	MIMO
Model Antena	Isotropic
Model Propagasi	Okumura-Hatta
Jumlah node user	6, 10
Dimensi Topografi	200 x 200 (m ²)
Skema modulasi	Adaptif (QPSK, 16 QAM, 64 QAM)
Mode Radio Akses	FDD
Channel Bandwidth	5 MHz
Loss Rate	10 ⁻⁶
Delay transmisi	2 ms
Ukuran window	65535
Jenis Trafik	Bulk Send Application
Algoritma Kontrol Kongesti	Westwood+
Durasi simulasi	300 s
Variasi topologi	1 eNodeB, 2 eNodeB

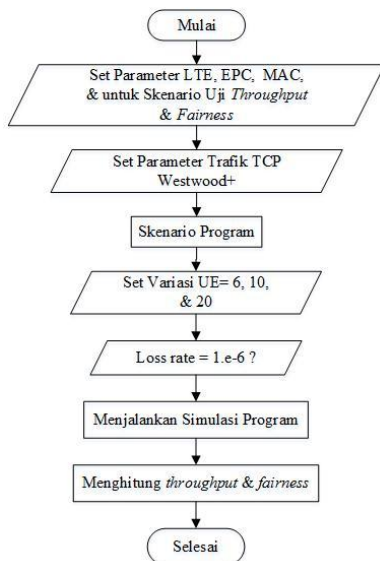
2.1. Pengujian *Throughput* dan *Fairness*

Pengujian simulasi untuk menentukan *throughput* dan *fairness* dengan memvariasikan jumlah user 6 UE, 10 UE dan 20 UE. Berikut salah satu bentuk topologi yang digunakan untuk jumlah user 6 UE dalam pengujian *throughput* dan *fairness* ditunjukkan seperti gambar 2.



Gambar 2. Topologi simulasi *throughput* dan *fairness* dengan variasi 6 UE

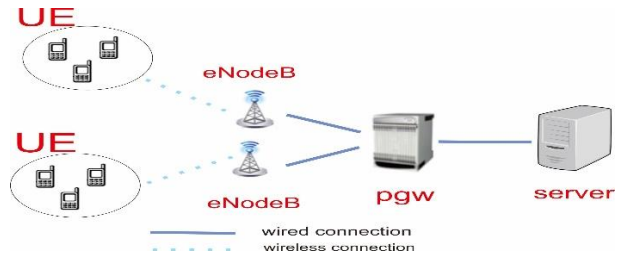
Adapun *flowchart* untuk pengujian ini seperti gambar 3.



Gambar 3. *Flowchart* pengujian *throughput* dan *fairness*

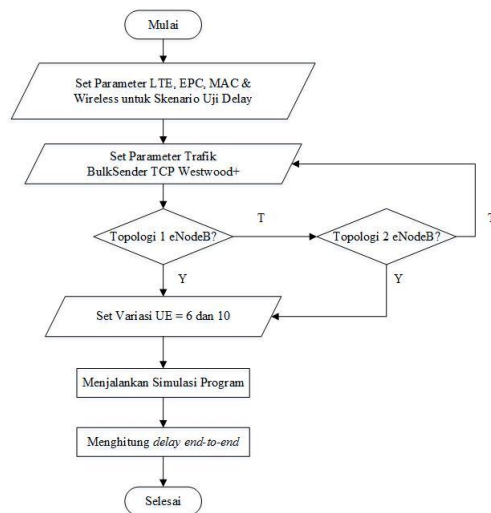
2.2. Pengujian *Delay end-to-end*

Pada skenario ini digunakan 2 variasi topologi yang berbeda yaitu topologi dengan 2 eNodeB dan 1 eNodeB dengan memvariasikan jumlah user yang digunakan 6 UE dan 10 UE. Berikut topologi 2 eNodeB yang digunakan untuk variasi 6 UE ditunjukkan seperti gambar 4.



Gambar 4. Topologi simulasi dengan 2 eNodeB dengan variasi 6 UE

Adapun *flowchart* untuk pengujian *delay end-to-end* seperti gambar 5.



Gambar 5. *Flowchart* skenario perhitungan *delay end-to-end*

3. Hasil dan Analisa

3.1. Statistik Simulasi

Statistik hasil simulasi dari variasi jumlah user yang digunakan dalam jaringan ditunjukkan pada tabel 3.

Tabel 3. Statistik simulasi variasi jumlah user

Waktu simulasi (s)	Jumlah user (UE)	Total antrian paket data (paket)	Total paket data dikirim (paket)	Total paket data diterima (paket)	Total paket drop (paket)
300	6	3543861	3543861	3542622	1231
	10	3570791	3570791	3569540	1241
	20	3626262	3626262	3624993	1253

Dapat dilihat pada tabel 3, variasi jumlah user 20 UE memiliki nilai paling besar diantara jumlah user yang lain dari segi total antrian paket data, total paket data dikirim, total paket data diterima, dan total paket data drop. Hal ini menandakan bahwa seiring bertambahnya jumlah user yang digunakan semakin besar pula jumlah paket yang dikirim dan diterima serta jumlah paket drop yang didapatkan.

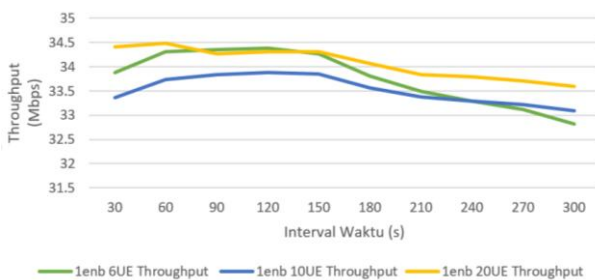
3.2. Analisis Throughput dan Fairness

Setelah dilakukan pengujian throughput dan fairness selama 300 detik sistem dihitung secara statistik dari hasil flow monitor untuk tiap variasi jumlah user. Tabel 4 menunjukkan data kirim dan terima dari setiap variasi user sehingga didapatkan jumlah paket hilang ditunjukkan seperti pada tabel 5.

Tabel 5. Statistik simulasi jumlah data hilang tiap variasi jumlah user

Interval (s)	1 eNB 6 UE (Mb)	1 eNB 10 UE (Mb)	1 eNB 20 UE (Mb)
30	37,493	36,990	38,136
60	76,060	74,830	76,500
90	114,152	112,517	113,980
120	152,363	150,158	152,105
150	189,658	187,372	189,971
180	224,639	223,004	226,399
210	259,627	258,752	262,356
240	294,984	295,018	299,338
270	330,145	331,114	336,043
300	363,565	366,495	372,238

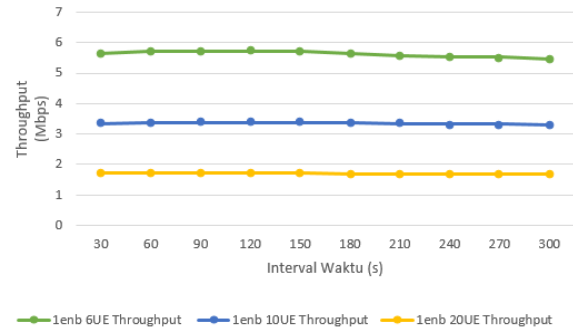
Dari tabel 5 terlihat bahwa variasi jumlah user 20 UE memiliki jumlah paket yang hilang lebih besar bila dibandingkan dengan variasi lainnya. Hal ini dikarenakan variasi 20 UE memiliki jumlah data kirim dan terima lebih besar sehingga lebih banyak mengalami kongesti daripada yang lain.



Gambar 6. Grafik throughput jaringan tiap variasi jumlah user

Dari grafik terlihat throughput keseluruhan jaringan bersifat fluktuatif seperti pada tabel 6 sebab terdapat pencegahan kongesti yang terjadi untuk mengurangi jumlah paket yang hilang. Selain itu, throughput sistem variasi jumlah user 20 UE paling tinggi karena ukuran window yang lebih besar dari variasi lainnya. Sedangkan

untuk grafik throughput per user untuk setiap variasi jumlah user ditunjukkan pada gambar 7.



Gambar 7. Grafik throughput per user tiap variasi jumlah user

Dari grafik terlihat bahwa di semua interval waktu pengujian, masing-masing variasi jumlah user memiliki nilai throughput yang hampir sama dimana untuk 6 UE 5,62858983 Mbps, 10 UE 3,352 Mbps, dan 20 UE 1,704 Mbps.

Fairness

Indeks fairness dari sistem secara keseluruhan dapat dihitung dengan menggunakan MinMax Fairness seperti persamaan berikut.

$$MinMax\ Fairness = \frac{Throughput_{min}}{Throughput_{max}} \tag{1}$$

Dengan persamaan (1), diperoleh fairness sistem jaringan seperti tabel 7.

Tabel 7. MinMax Fairness tiap variasi jumlah user

No	Variasi Jumlah User	MinMax Fairness
1	6 UE	0,964343311
2	10 UE	0,964328776
3	20 UE	0,964323781

Terlihat bahwa indeks fairness sistem jaringan yang terbaik mendekati 1, dimiliki oleh variasi user 6 UE. Hal ini menunjukkan tingkat keadilan throughput sangat baik. Sedangkan untuk indeks fairness per user dapat dicari dengan menggunakan persamaan Jain's Fairness Index.

$$Jain's\ Fairness\ Index = \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n * (\sum_{i=1}^n x_i^2)} \tag{2}$$

Dengan persamaan (2), diperoleh indeks fairness per user seperti tabel 8.

Tabel 8. Indeks fairness per user tiap variasi jumlah user

No	Variasi Jumlah User	Jain's Fairness
1	6 UE	0,999215807
2	10 UE	0,999231122
3	20 UE	0,998790391
	Rata-rata	0,999079107

Dari tabel 8, dapat diketahui bahwa rata-rata indeks *fairness* per *user* sebesar 0.999079107. Sedangkan indeks *fairness* per *user* yang sangat baik dimiliki oleh 10 UE dari pada variasi lainnya.

3.3. Analisis Delay End-to-end

Analisis *delay end-to-end* dilakukan pada 2 variasi topologi yaitu 2 eNodeB dan 1 eNodeB dimana masing-masing topologi divariasikan kembali dengan jumlah *user* 6 UE dan 10 UE. Sehingga didapatkan perbandingan *delay end-to-end* seperti pada tabel 9.

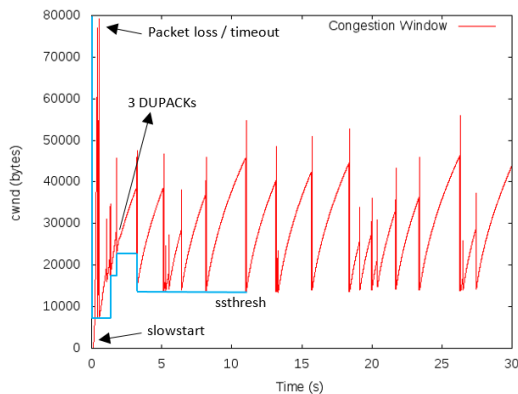
Tabel 9. Perbandingan *delay* tiap topologi jaringan.

No	Topologi Jaringan	Rata-rata Delay End-to-end (ms)
1	2 eNodeB 6 UE	2,0373
2	2 eNodeB 10 UE	2,3044
3	1 eNodeB 6 UE	2,0236
4	1 eNodeB 10 UE	2,0234

Dari tabel 9 menunjukkan bahwa rata-rata *delay end-to-end* untuk topologi 1 eNodeB lebih kecil apabila dibandingkan dengan topologi 2 eNodeB.

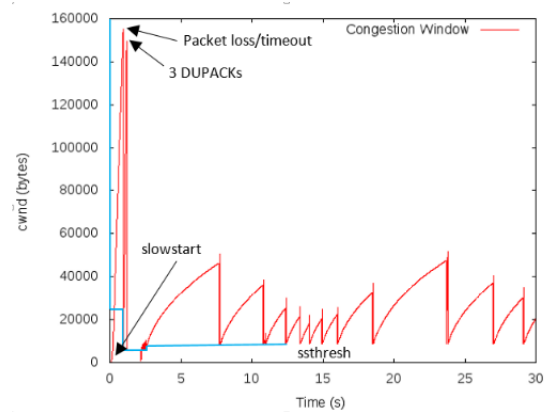
3.4. Analisis Congestion Window

Analisis kongesti *window* ini menunjukkan pencegahan kongesti algoritma dari TCP *Westwood+* untuk topologi 1 eNodeB dengan variasi jumlah *user* 6 UE, 10 UE dan 20 UE dengan rentang waktu simulasi 300 detik.



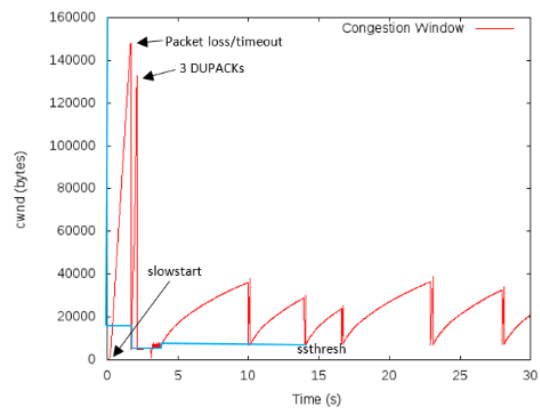
Gambar 8. Pencuplikan kongesti *window* dengan variasi jumlah *user* 6 UE

Terlihat pada gambar 8, untuk ukuran *window* paling tinggi mencapai 79251 pada ke 0,53493 detik. Selain itu, terlihat pula proses *slowstart*, naiknya ukuran *window* secara cepat dan eksponensial menyebabkan terjadinya *timeout* atau *packet loss* hingga masuk ke dalam kondisi pencegahan kongesti setelah menerima 3 DUPACKS dan melakukan retransmisi hingga mencapai posisi *ssthresh* dengan menentukan estimasi *bandwidth* yang tersedia.



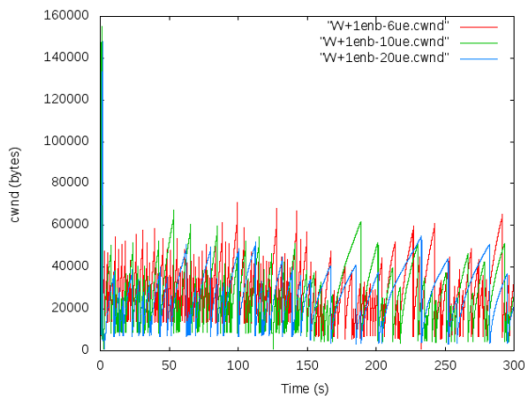
Gambar 9. Pencuplikan kongesti *window* dengan variasi jumlah *user* 10 UE

Dari gambar 9, terlihat ukuran *window* paling besar mencapai 150000 pada ke 0,945 detik. Selain itu, terlihat pula proses *slowstart*, naiknya ukuran *window* secara cepat dan eksponensial menyebabkan terjadinya *timeout* atau *packet loss* hingga masuk ke dalam kondisi pencegahan kongesti setelah menerima 3 DUPACKS dan melakukan retransmisi hingga mencapai posisi *ssthresh* dengan menentukan estimasi *bandwidth* yang tersedia.



Gambar 10. Pencuplikan kongesti *window* dengan variasi jumlah *user* 20 UE

Pada gambar 10, sama seperti variasi jumlah user 6 UE dan 10 UE, ukuran *window* yang terjadi paling besar mencapai 148000 pada ke 1,669 detik. Selain itu, terlihat pula proses *slowstart*, naiknya ukuran *window* secara cepat dan eksponensial menyebabkan terjadinya *timeout* atau *packet loss* hingga masuk ke dalam kondisi pencegahan kongesti setelah menerima 3 DUPACKS dan melakukan retransmisi hingga mencapai posisi *ssthresh* dengan menentukan estimasi *bandwidth* yang tersedia.



Gambar 11. Grafik perbandingan kongesti window tiap variasi jumlah user

Dapat dilihat dari grafik gambar 11 bahwa pencegahan kongesti terjadi secara adaptif dengan mengestimasi *bandwidth* yang tersedia. Pada grafik terlihat untuk jumlah *user* 10 UE memiliki rata-rata ukuran *window* yang paling besar diantara yang lain yaitu 155000. Hal ini mempengaruhi jumlah data kirim yang dilewatkan sehingga nilai *throughput* yang dihasilkan lebih kecil bila dibandingkan dengan jumlah *user* yang lain.

LAMPIRAN A

Tabel 4. Statistik simulasi jumlah data kirim dan terima tiap variasi jumlah UE.

Interval (s)	1 eNB 6 UE		1 eNB 10 UE		1 eNB 20 UE	
	Data Kirim (Mb)	Data Terima (Mb)	Data Kirim (Mb)	Data Terima (Mb)	Data Kirim (Mb)	Data Terima (Mb)
30	1050,250	1012,757	1034,383	997,393	1066,751	1028,615
60	2131,164	2055,104	2095,676	2020,846	2140,973	2064,473
90	3201,166	3087,014	3153,931	3041,414	3194,054	3080,074
120	5324,957	5135,300	5260,198	5072,826	5331,107	5141,136
150	6306,831	6082,192	6260,522	6037,518	6354,302	6127,903
180	7289,343	7029,716	7262,856	7004,104	7363,738	7101,382
210	8281,700	7986,716	8281,185	7986,167	8403,672	8104,334
240	9269,620	8939,475	9296,466	8965,352	9433,061	9097,018
270	10207,045	9843,480	10288,325	9921,830	10447,599	10075,361
300	5324,957	5135,300	5260,198	5072,826	5331,107	5141,136

Tabel 6. Statistik simulasi *throughput* dan *send rate* tiap variasi jumlah UE.

Interval (s)	1 eNB 6 UE		1 eNB 10 UE		1 eNB 20 UE	
	Send Rate (Mb)	Throughput (Mb)	Send Rate (Mb)	Throughput (Mb)	Send Rate (Mb)	Throughput (Mb)
30	35,131	33,874	34,602	33,363	35,691	34,413
60	35,581	34,310	34,990	33,740	35,757	34,478
90	35,616	34,346	35,085	33,833	35,534	34,265
120	35,659	34,388	35,130	33,877	35,578	34,309
150	35,524	34,259	35,093	33,842	35,571	34,303
180	35,058	33,810	34,801	33,561	35,324	34,065
210	34,729	33,491	34,603	33,370	35,084	33,834
240	34,522	33,292	34,520	33,290	35,036	33,788
270	34,346	33,122	34,445	33,218	34,952	33,707
300	34,036	32,823	34,307	33,084	34,838	33,597
Rata-rata	35,020	33,772	34,758	33,518	35,336	34,076

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian ini, disimpulkan bahwa TCP *Westwood+* dengan topologi 1 eNodeB dengan variasi jumlah *user* 20 UE memiliki rata-rata *throughput* jaringan yang paling tinggi sebesar 34,076 Mbps dengan indeks *fairness* sistem keseluruhan yang paling rendah bernilai 0,964323781. Sedangkan untuk jumlah *user* 6 UE memiliki *throughput* yang rendah sebesar 33,772 Mbps tetapi indeks *fairness* yang lebih tinggi bernilai 0,964328776 sehingga tingkat keadilan sangat baik. Selain itu, hasil *throughput* tiap *user* memiliki nilai yang hampir sama, dimana pada variasi 6 UE memiliki nilai rata-rata *throughput* yang lebih tinggi sebesar 5,629 Mbps bila dibandingkan variasi jumlah *user* 10 UE sebesar 3,352 Mbps dan 20 UE sebesar 1,704 Mbps dikarenakan pembagian kanal berdasarkan pada jumlah *user* yang digunakan. Dari sisi ukuran *window* untuk topologi 1 eNodeB, variasi jumlah *user* 10 UE memiliki ukuran *window* yang paling besar dibandingkan dengan variasi lainnya. Dari sisi *delay end-to-end*, untuk topologi 1 eNodeB memiliki *delay end-to-end* lebih kecil baik untuk jumlah *user* 6 UE sebesar 2,0236 ms dan 10 UE sebesar 2,0234 ms jika dibandingkan dengan topologi 2 eNodeB jumlah *user* 6 UE sebesar 2,0373 ms dan 10 UE sebesar 2,3044 ms, hal ini menjelaskan bahwa kontrol kongesti TCP *Westwood+* yang paling baik digunakan adalah topologi 1 eNodeB.

Referensi

- [1]. Permatasari, G. K. "Analisis Kinerja TCP Westwood Untuk Pencegahan Kongesti Pada Jaringan LTE Dengan Menggunakan Network Simulator 2.33 (NS2.33)", Laporan Tugas Akhir, Departemen Teknik Elektro, Universitas Diponegoro, Semarang, 2014.
- [2]. Sukiswo. "Perbaikan Tcp Westwood+", Tesis, ITB, Bandung, 2007.
- [3]. S. Gangadhar, T. A. N. Nguyen, G. Umapathi, dan J. P. G. Sterbenz, "TCP Westwood (+) Protocol Implementation in ns-3," pp. 0-8, 2013.
- [4]. S. Mascolo, L. Grieco, R. Ferorelli, P. Camarda, dan G. Piscitelli. "Performance Evaluation of Westwood+ TCP Congestion Control", Performance Evaluation, vol. 55, pp. 93-111, Jan. 2004.
- [5]. G. Abed, M. Ismail, dan K. Jumari, "Improvement of TCP Congestion Window over LTE-Advanced Networks," Int. J. Adv. Res. Comput. Commun. Eng., vol. 1, no. 4, pp. 185-192, 2012.
- [6]. M. Pelcat, S. Aridhi, J. Piat, and J.-F. N. Telecommunication, Physical Layer Multi-Core Prototyping "A Dataflow-Based Approach for LTE eNodeB." London: Springer-Verlag London, 2013.
- [7]. U. K. Usman, G. Prihatmoko, D. K. Hendraningrat, dan S. D. Purwanto, Fundamental Teknologi Seluler LTE. Bandung, Indonesia: Rekayasa Sains, 2012.
- [8]. "THE LTE," April. 2014. [Online]. Tersedia: <https://www.signalsresearch.com>.
- [9]. Rachmat, M. Teknologi Jaringan Akses LTE (Long Term Evolution). Makalah Teknik Telekomunikasi Jurusan Elektro Universitas Hasanuddin. 2013.
- [10]. 3GPP LTE. [Online]. Tersedia: <https://www.3gpp.org/>
- [11]. LTE Resource Guide, 1155 East Collins Blvd., Suite 100, Richardson, TX 75081, USA, 2009. [Online]. Tersedia: <https://www.cs.columbia.edu>.
- [12]. E. R. Series and W. Papers, "Expert Reference Series of White Papers The OSI Model : Understanding the Seven Layers of Computer Networks The OSI Model : Understanding the Seven Layers of Computer Networks," pp. 1-11.
- [13]. H. G. Myung, "Technical Overview of 3GPP LTE," 2008.
- [14]. McKinney, Gordon. TCP/IP State Transition Diagram (RFC793). Publishing Company. pp. 1-2, 2002.
- [15]. Susanto, Budi. Modul Jaringan Komputer Protocol Transport (TCP/UDP). 2009.
- [16]. TCP Westwood+ modules for ns2, 2003. [Online]. Tersedia: <http://193.204.59.68/mascolo/tcp%20westwood/modules.htm>
- [17]. The ns-3 Network Simulator Doxygen Documentation. [Online]. Tersedia: <https://www.nsnam.org/ns-3.25/documentation/>