

Analisis Perbandingan Kinerja Algoritma Penjadwalan EXP/PF, PF dan FLS Kasus Single Cell pada jaringan LTE

Resta Stefano, Dr.Maman Abdurohman

chorolaut@gmail.com

Abstrak- Jaringan LTE adalah evolusi dari jaringan GSM yang memungkinkan pengguna untuk mengunduh data yang berkapasitas besar dengan kecepatan yang tinggi. LTE menyediakan kecepatan *download* hingga 100 Mbps dan kecepatan *upload* hingga 50 Mbps. Berdasarkan kecepatan tersebut, pengguna dapat menggunakan layanan-layanan multimedia seperti VoIP, *video streaming*, dan *download* data berukuran besar tanpa hambatan yang berarti. Untuk mendukung kinerja jaringan LTE, dibutuhkan algoritma penjadwalan yang efisien. Maka dari itu, penulis akan membandingkan beberapa algoritma penjadwalan yang sering digunakan dalam jaringan LTE dengan melakukan simulasi, diantaranya algoritma EXP/PF, PF dan FLS. Hal yang menjadi perhatian dari penelitian ini adalah *Quality of Service* dari algoritma-algoritma tersebut. parameter-parameter yang akan dianalisis meliputi *delay*, *throughput*, *fairness* dan *packetloss*.

Dari hasil simulasi, dapat disimpulkan bahwa algoritma FLS memiliki performansi yang lebih baik daripada algoritma PF dan EXP/PF untuk jenis trafik data *real-time* seperti video .

Kata Kunci : LTE, QoS, FLS, EXP/PF, PF

Abstract- *LTE network is an evolution of GSM network that enables user to download huge capacity data with high speed. LTE provides download speed up to 100 Mbps and upload speed up to 50 Mbps. Based on this speed, user can use multimedia services such as VoIP, video streaming, and to download large data without meaningful obstacle. To support the performance of LTE networks, it needs an efficient scheduling algorithm. Therefore, the author is going to compare several scheduling algorithms that often used in LTE networks through a simulation. The algorithms to be compared are EXP/PF, PF and FLS. The things that's going to be noticed of this research is Quality of Service from these algorithms. The parameters that are going to be analyzed include delay, throughput, fairness, and packet loss.*

From the simulation result, it can be concluded that FLS algorithm has better performance than PF algorithm EXP/PF for the real-time data traffic like video.

Keywords : LTE, QoS, FLS, EXP/PF, PF

1. Pendahuluan

Saat ini jaringan LTE diklaim sebagai jaringan *wireless* tercepat yang merupakan generasi lanjutan dari GSM dan HSPA. LTE memberikan kecepatan *uplink* hingga 50 megabit per second dan kecepatan *downlink* hingga 100 Mbps. LTE merupakan evolusi dari jaringan seluler yang dipersiapkan untuk teknologi 4G. Melalui kombinasi kecepatan *downlink* dan *uplink* yang sangat tinggi, efisien, dan fleksibel dalam penggunaan spektrum dan dapat mengurangi latensi paket. LTE menjanjikan untuk peningkatan layanan *mobile broadband*. Keuntungan yang diperoleh oleh user dari hal

ini antara lain *streaming* skala besar, *download* dan *upload* musik, video, dan konten multimedia lainnya. Untuk keperluan bisnis, LTE dapat memberikan transfer file besar dengan kecepatan tinggi dan video conference berkualitas tinggi.

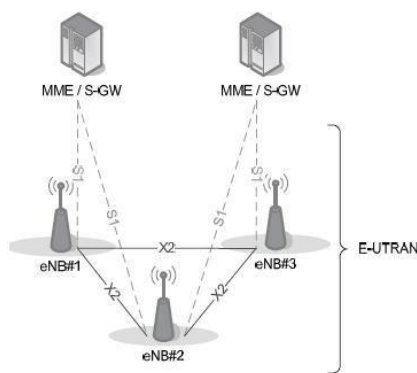
Untuk mendukung kualitas pelayanan terbaik yang diberikan oleh LTE, maka dibutuhkan algoritma penjadwalan yang tepat dan efisien. Dalam penelitian ini, penulis akan membandingkan tiga algoritma penjadwalan yang ada saat ini, yaitu FLS, EXP/PF, dan PF. Hal yang dibandingkan terutama performansinya dengan memperhatikan

beberapa parameter seperti *throughput*, *fairness*, *delay*, dan *packetloss*.

Saat ini jaringan LTE diklaim sebagai jaringan *wireless* tercepat yang merupakan generasi lanjutan dari GSM dan HSPA. LTE memberikan kecepatan *uplink* hingga 50 megabit per second dan kecepatan *downlink* hingga 100 Mbps. LTE merupakan evolusi dari jaringan seluler yang dipersiapkan untuk teknologi 4G. Melalui kombinasi kecepatan *downlink* dan *uplink* yang sangat tinggi, efisien, dan fleksibel dalam penggunaan spektrum dan dapat mengurangi latensi paket. LTE menjanjikan untuk peningkatan layanan *mobile broadband*. Keuntungan yang diperoleh oleh user dari hal ini antara lain *streaming* skala besar, *download* dan *upload* musik, video, dan konten multimedia lainnya. Untuk keperluan bisnis, LTE dapat memberikan transfer file besar dengan kecepatan tinggi dan video conference berkualitas tinggi.

Untuk mendukung kualitas pelayanan terbaik yang diberikan oleh LTE, maka dibutuhkan algoritma penjadwalan yang tepat dan efisien. Dalam penelitian ini, penulis akan membandingkan tiga algoritma penjadwalan yang ada saat ini, yaitu FL S, EXP/PF, dan PF. Hal yang dibandingkan terutama performansinya dengan memperhatikan beberapa parameter seperti *throughput*, *fairness*, *delay*, dan *packetloss*.

2.Arsitektur LTE



Gambar 1. Diagram jaringan E-UTRAN [8]

Arsitektur jaringan LTE merupakan arsitektur yang sederhana, yaitu hanya terdiri dari dua node yaitu eNodeB dan *mobility management entity/gateway* (MME/GW). Maka dari itu, *latency* dan distribusi beban proses RNC pada eNodeB dapat dikurangi. Ada dua macam jaringan dasar dari LTE, yaitu *Evolved Packet Core* (EPC) dan *Radio Access Network* (E-UTRAN).

Berdasarkan gambar 1.2, dapat dilihat bahwa E-UTRAN sangat fleksibel. Satu eNodeB dapat berhubungan dengan MME/UE manapun. Berikut elemen-elemen yang terdapat dalam arsitektur jaringan LTE.

1. Home Subscriber Server (HSS)

HSS merupakan database utama yang ada pada jaringan LTE. HSS adalah sebuah super HLR yang mengkombinasikan fungsi HLR sebagai database dan AuC sebagai autentikasi

2. Serving Gateway (SGW)

SGW terdiri dari dua bagian, yaitu 3GPP Anchor dan SAE Anchor. 3GPP Anchor berfungsi sebagai gateway paket data yang berasal dari jaringan 3GPP, sedangkan SAE Anchor berfungsi sebagai gateway jaringan non-3GPP. SGW merutekan dan meneruskan paket data dari user, sekaligus berfungsi sebagai mobility anchor saat handover antar eNodeB dan menghubungkan LTE dengan jaringan yang lain.

3. Mobility Management Entity (MME)

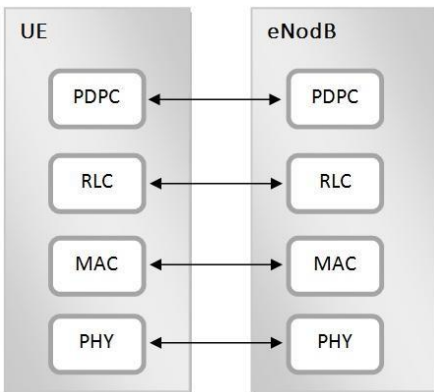
MME adalah node control utama pada jaringan akses LTE. MME berperan dalam proses aktivasi dan autentikasi user. MME berfungsi mengatur handover, yaitu memilih MME lain untuk handover dengan MME lain.

4. eNodeB

eNodeB merupakan interface dengan UE (User Equipment). eNodeB berfungsi sebagai Radio Resource

Management (RRM) yang bertugas mengontrol dan mengawasi pengiriman sinyal yang dibawa oleh sinyal radio, berperan dalam autentikasi atau mengontrol kelayakan data yang akan melewati eNodeB, dan untuk mengatur scheduling.

3. Protocol stack



Gambar 2. Diagram user plane protocol stack

Masing-masing bagian dijelaskan sebagai berikut:

1. Packet Data Convergence Protocol (PDPC)
 PDPC berfungsi untuk mengompresi header dari paket IP user plane menggunakan ROHC. mentransfer data user, deteksi duplikasi pada lower layer SDU. Ciphering dan deciphering.
2. Radio Link Control (RLC)
 Fungsi utama RLC adalah mengoreksi error menggunakan ARQ, konkatenas i, segmentasi, dan reassembly RLC SDU, deteksi duplikasi, deteksi error pada protokol dan recovery.

3. Medium Access Control (MAC)

Pada layer MAC terjadi proses scheduling untuk layanan dengan dua arah, yaitu *uplink* dan *downlink*.

4. Penjadwalan

diperlukan untuk memenuhi persyaratan QoS dari layanan LTE. Mekanisme penjadwalan dilakukan oleh *scheduler* yang berada dalam eNodeB. *Scheduler* dapat menentukan urutan paket yang akan ditransmisikan, karena masing-masing aliran paket pada suatu layanan tertentu memiliki persyaratan QoS yang harus dipenuhi. Algoritma penjadwalan yang akan dibandingkan pada penelitian ini antara lain algoritma FLS, PF, dan EXP/PF.

4.1 Algoritma Frame Level Scheduler (FLS)

FLS adalah pola penjadwalan yang terdapat di level atas dari dua level penjadwalan. Algoritma dengan alokasi sumber yang berkompleksitas rendah berdasarkan teori control linear waktu diskret, diimplementasikan di level atas ini. Algoritma ini menghitung jumlah data yang masing-masing sumber *real-time* harus mentransmisikan ke dalam *single frame*, untuk memenuhi batas delay^[1]. Persamaan berikut menghitung jumlah data yang akan ditransmisikan:

$$D_k = h_i(k) \times Q_k$$

Dimana D_k berkorespondensi ke jumlah data yang ditransmisikan selama k^{th} frame. Persamaan di atas memberitahukan bahwa jumlah data yang akan ditransmisikan oleh aliran i^{th} selama LTE frame k^{th} memperoleh

dengan memfilter sinyal $h_i(k)$.

4.2 Algoritma Proportional Fair (PF)

Algoritma PF dikembangkan untuk mendukung layanan *Non Real Time* (NRT) dalam sistem *Code Division Multiple Acces - High Data Rate* (CDMA - HDR). Algoritma ini menyediakan *trade-off* dari total *throughput* dan *fairness* antar pengguna. PF melibatkan *data rate* lama dan kondisi channel ketika menentukan sumber radio^[6]. Algoritma PF mengalokasikan sumber kepada *user* yang memaksimalkan matriks k , didefinisikan sebagai rasio:

$$k = \arg \max_k \frac{r_k}{W_k}$$

Dimana;

$$r_k = 1 - \frac{1}{W_k} * (r_k - 1) + \frac{1}{W_k} * (r_k - 1)$$

Dimana r_k adalah *data rate* yang dapat dicapai oleh *user* ipada waktu t , W_k adalah rata-rata *data rate* yang dapat dicapai oleh *user* ipada waktu t , W_k adalah ukuran dari *window* terbaru, yang memungkinkan algoritma PF untuk memaksimalkan *throughput* dan *fairness* dari masing-masing user, dan jika $r_k - 1 = 0$ user tidak dipilih untuk

4.3 Algoritma Eksponensial Proportional Fair (EXP/PF)

Algoritma EXP/PF diusulkan untuk sistem *Adaptive Modulation and Coding and Time Division Multiplexing* (AMC/TDM). EXP/PF digunakan jika terdapat perbedaan tipe layanan (NRT service atau RT service)^[6]. sumber dialokasikan kepada *user* berdasarkan persamaan berikut:

$$k = \arg \max_k \frac{r_k}{1 + W_k(t)}$$

Dimana;

$$W_k(t) = \frac{1}{W_k(t)}$$

$$W_k(t) = \frac{1}{W_k(t)} - 1 - \epsilon \quad W_k(t) > \tau_k$$

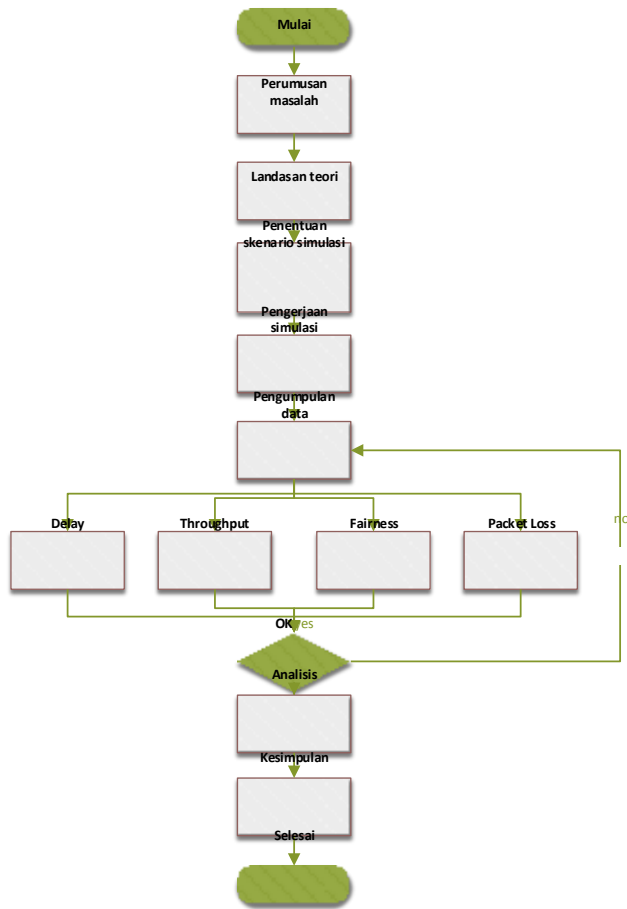
$$W_k(t) = \frac{1}{W_k(t)} - 1 + \epsilon \quad W_k(t) < \tau_k$$

Dimana $M(t)$ adalah rata-rata dari jumlah paket pada buffer eNB^(2,3) pada saat t , k dan ϵ konstan, $W_k(t)$ adalah HOL delay paket dari RT service dan τ_k adalah delay maksimum

bertransmisi pada waktu $t - 1$.

dari RT service user. Algoritma EXP/PF memprioritaskan RT *traffic user* dari NRT *traffic user* ketika *delay* HOL mendekati *deadline* dari *delay* tersebut.

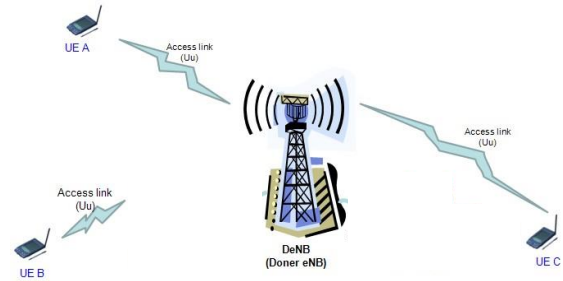
5. Perancangan sistem



Gambar 3. Flowchart penelitian

6. Desain simulasi

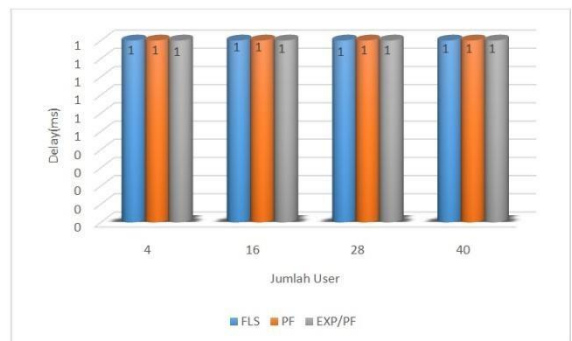
Dalam penelitian ini, model simulasi menggunakan satu buah sel. *User* bergerak dengan kecepatan tertentu secara acak. Simulasi ini dilakukan dengan jumlah user dan jenis trafik yang bervariasi. Proses *scheduling* terjadi dalam eNodeB pada arah *downlink*.



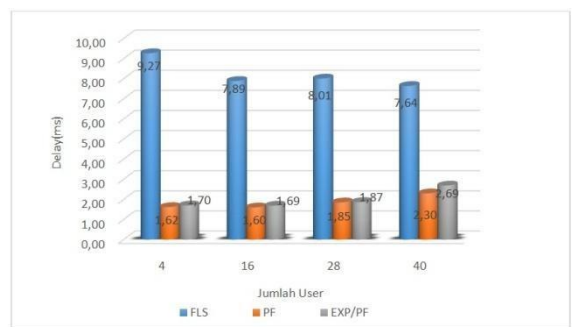
Gambar 4. Desain Simulasi

7. Analisis

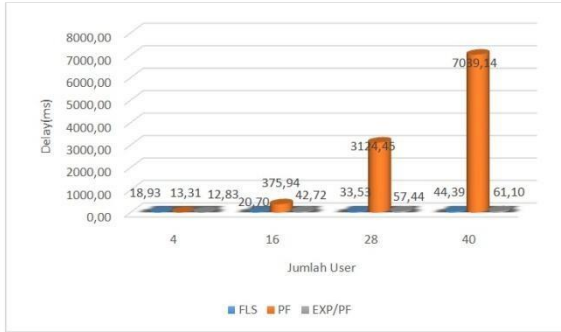
7.1 Analisis pada Skenario Kecepatan 3 Km/jam



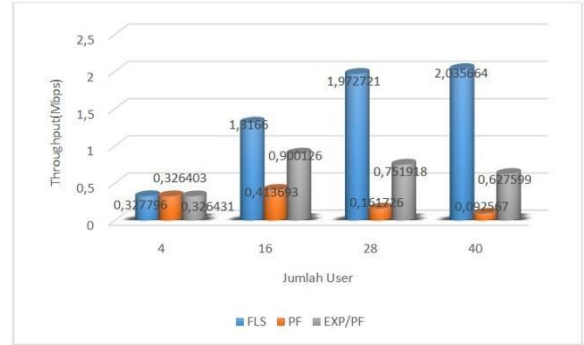
Gambar 5. Delay BE berdasarkan jumlah user pada kecepatan 3 km/jam



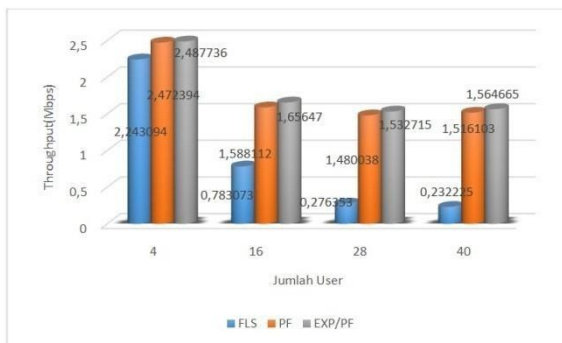
Gambar 6. Delay VoIP berdasarkan jumlah user pada kecepatan 3 km/jam



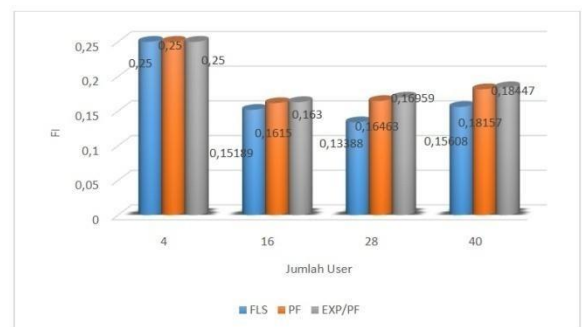
Gambar 7. Delay Video berdasarkan jumlah user pada kecepatan 3 km/jam



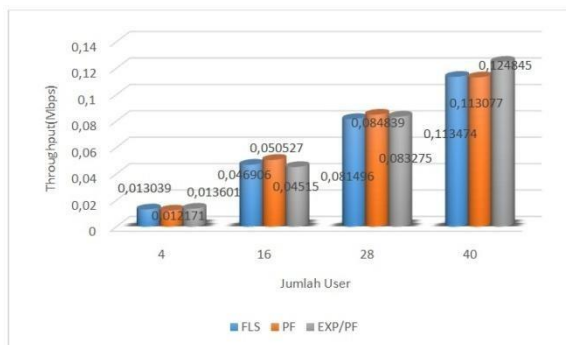
Gambar 10. Throughput video berdasarkan jumlah user pada kecepatan 3 km/jam



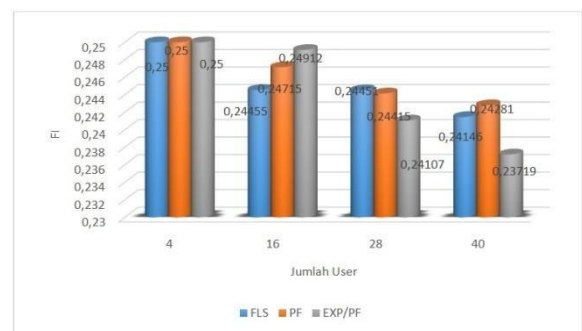
Gambar 8. Throughput BE berdasarkan jumlah user pada kecepatan 3 km/jam



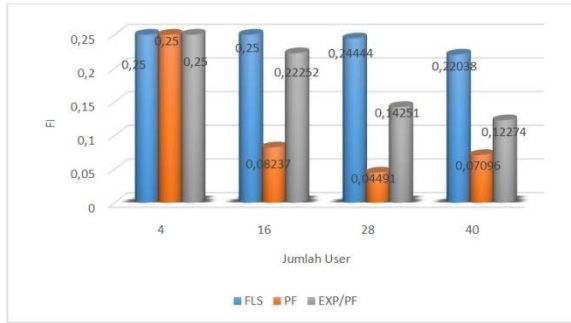
Gambar 11. Fairness BE berdasarkan jumlah user pada kecepatan 3 km/jam



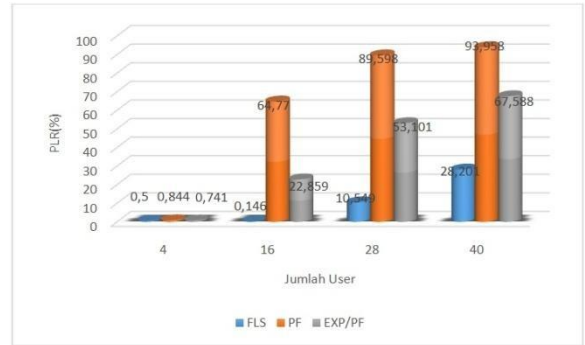
Gambar 9. Throughput VoIP berdasarkan jumlah user pada kecepatan 3 km/jam



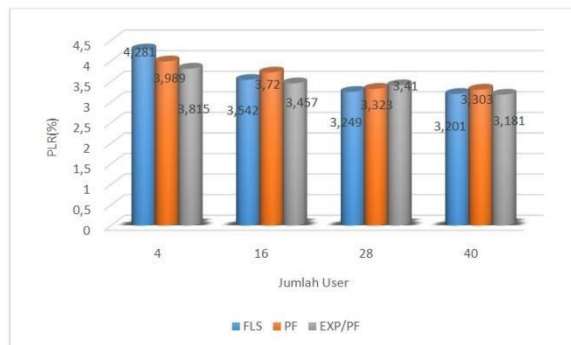
Gambar 12. Fairness VoIP berdasarkan jumlah user pada kecepatan 3 km/jam



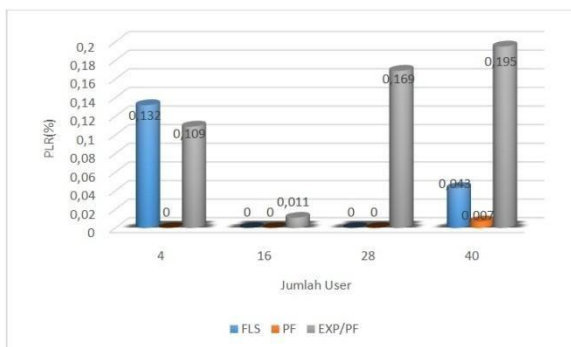
Gambar 13. Fairness video berdasarkan jumlah user pada kecepatan 3 km/jam



Gambar 16. PLR video berdasarkan jumlah user pada kecepatan 3 km/jam



Gambar 14. PLR BE berdasarkan jumlah user pada kecepatan 3 km/jam



Gambar 15. PLR VoIP berdasarkan jumlah user pada kecepatan 3 km/jam

Delay: Seperti yang terlihat pada gambar 5, delay pada BE hanya sebesar 1 ms untuk setiap jumlah user. Hal ini menunjukkan bahwa paket yang dikirimkan selalu tersedia karena paket buffer yang tak terbatas. Untuk trafik VoIP, terlihat pada gambar 6 bahwa algoritma FLS menghasilkan delay yang besar pada layanan VoIP di semua jumlah user, sedangkan delay pada algoritma PF rata-rata lebih kecil daripada algoritma lainnya. pada trafik video, seperti yang ditunjukkan oleh gambar 7, algoritma EXP/PF dan FLS menghasilkan delay yang sangat kecil. Lain halnya dengan algoritma PF yang justru menghasilkan kenaikan nilai delay yang amat sangat signifikan pada setiap penambahan jumlah user.

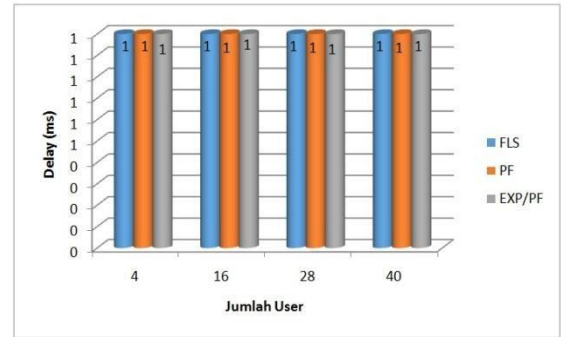
Throughput: Pada gambar 8 terlihat bahwa nilai throughput untuk algoritma FLS pada trafik BE cenderung mengalami penurunan yang signifikan seiring bertambahnya user, dibandingkan dengan algoritma PF dan EXP/PF yang cenderung konstan. Nilai throughput pada layanan VoIP

untuk semua algoritma, rata-rata semakin tinggi seiring bertambahnya user. untuk video, algoritma FLS menghasilkan nilai throughput yang semakin membesar di setiap penambahan user. Hal ini berbanding terbalik dengan algoritma PF, yang justru nilai throughputnya semakin mengecil.

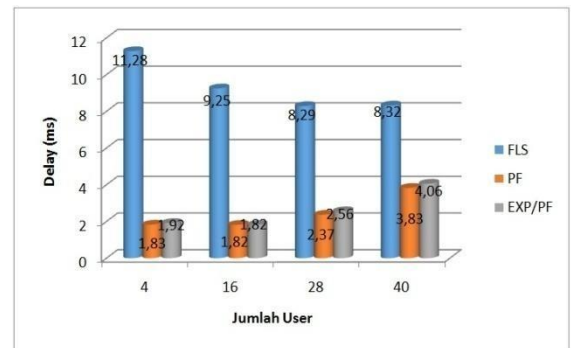
Fairness: untuk trafik BE, nilai fairness ketiga algoritma sama untuk jumlah user 4. Untuk jumlah user berikutnya, nilai fairness ketiga algoritma tidak jauh berbeda. Untuk VoIP, seperti terlihat pada gambar 12, nilai fairness ketiga algoritma sama untuk jumlah user 4. Untuk jumlah user berikutnya, nilai fairness ketiga algoritma tidak menentu. Untuk trafik video seperti ditunjukkan oleh gambar 13, nilai fairness ketiga algoritma sama pada jumlah user 4. Untuk jumlah user berikutnya, nilai fairness pada algoritma FLS lebih tinggi, sedangkan pada algoritma PF nilai fairnessnya berkurang drastis.

Packet Loss Ratio: Pada trafik BE, nilai PLR untuk algoritma FLS cenderung menurun seiring bertambahnya user, begitu pula dengan algoritma PF dan EXP/PF. Pada trafik VoIP, nilai PLR sangat tinggi untuk algoritma FLS dan user 4. PLR untuk algoritma EXP/PF tertinggi untuk jumlah user 40. Sedangkan PLR untuk algoritma PF hampir 0 % di setiap jumlah user. Pada trafik video, seperti ditunjukkan gambar 16, PLR ketiga algoritma untuk user 4 sangat kecil. Untuk jumlah user berikutnya, PLR pada algoritma PF cenderung meningkat.

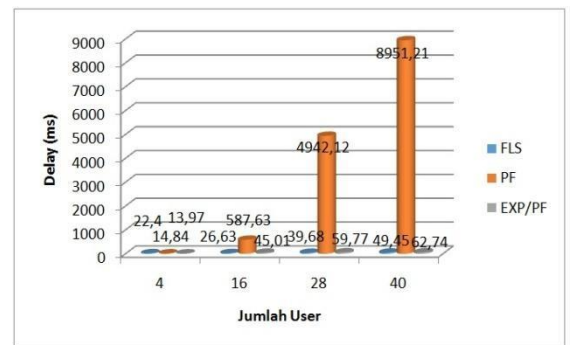
7.2 Analisis pada Skenario Kecepatan 30 Km/jam



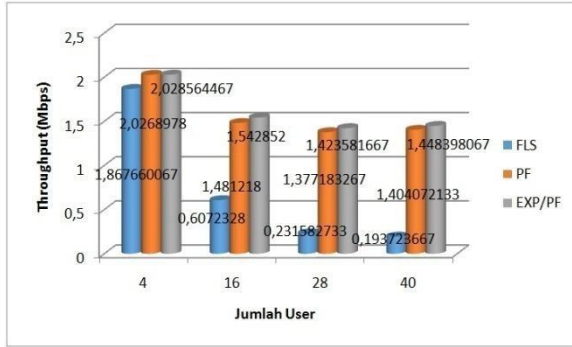
Gambar 17. Delay BE berdasarkan jumlah user pada kecepatan 30 km/jam



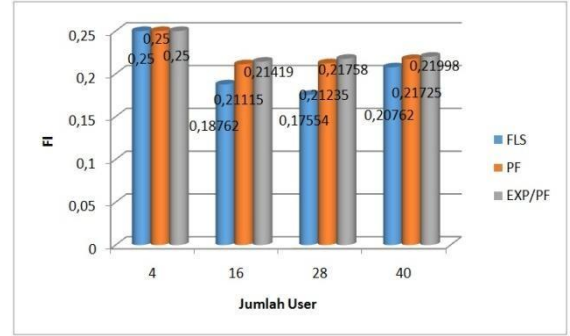
Gambar 18. Delay VoIP berdasarkan jumlah user pada kecepatan 30 km/jam



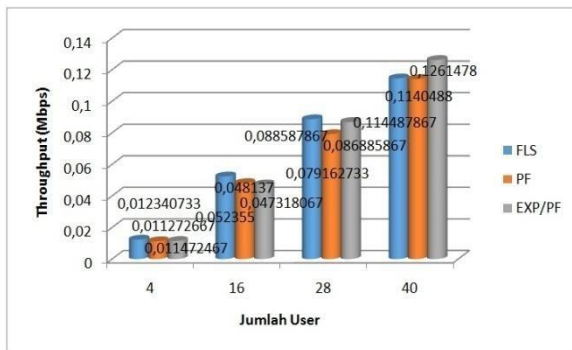
Gambar 19. Delay video berdasarkan jumlah user pada kecepatan 30 km/jam



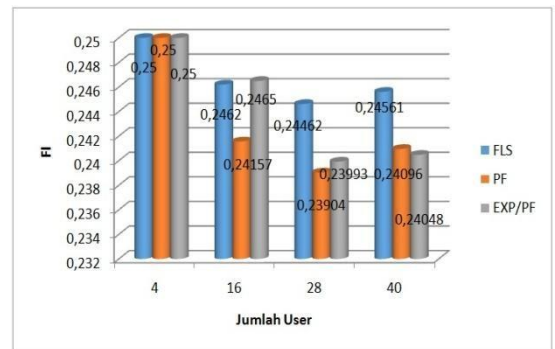
Gambar 20. Throughput BE berdasarkan jumlah user pada kecepatan 30 km/jam



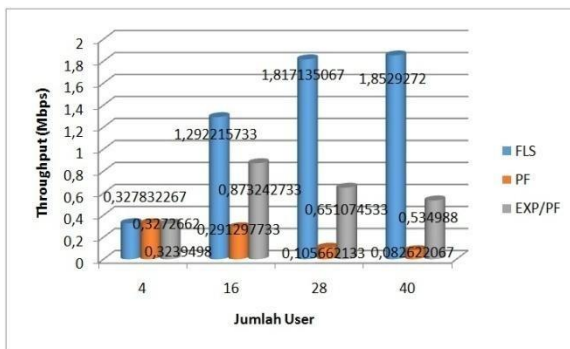
Gambar 23. Fairness BE berdasarkan jumlah user pada kecepatan 30 km/jam



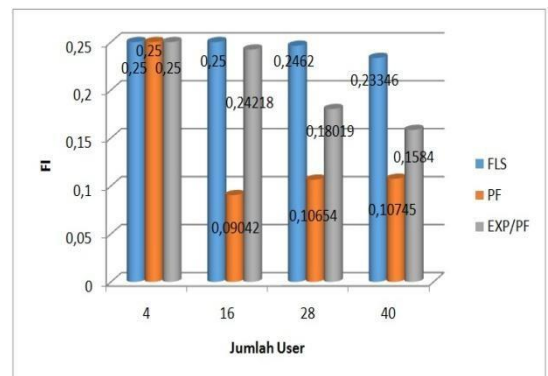
Gambar 21. Throughput VoIP berdasarkan jumlah user pada kecepatan 30 km/jam



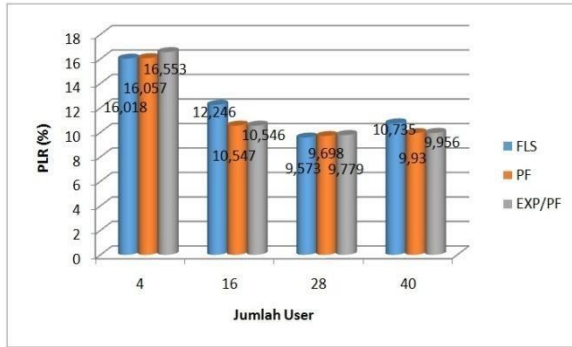
Gambar 24. Fairness VoIP berdasarkan jumlah user pada kecepatan 30 km/jam



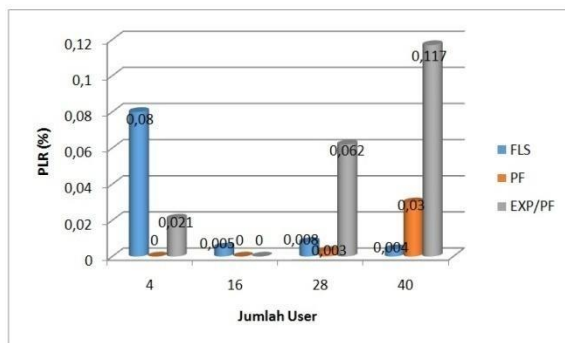
Gambar 22. Throughput video berdasarkan jumlah user pada kecepatan 30 km/jam



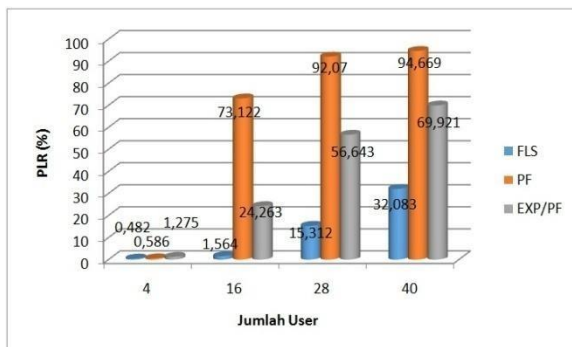
Gambar 25. Fairness video berdasarkan jumlah user pada kecepatan 30 km/jam



Gambar 26. PLR BE berdasarkan jumlah user pada kecepatan 30 km/jam



Gambar 27. PLR VoIP berdasarkan jumlah user pada kecepatan 30 km/jam



Gambar 28. PLR video berdasarkan jumlah user pada kecepatan 30 km/jam

Delay: Seperti yang terlihat pada gambar 17, delay pada BE hanya sebesar 1 ms untuk setiap jumlah user. Hal ini menunjukkan

bahwa paket yang dikirimkan selalu tersedia karena paket buffer yang tak terbatas untuk semua algoritma penjadwalan. Untuk trafik VoIP, terlihat pada gambar 18 bahwa algoritma FLS menghasilkan delay yang besar pada layanan VoIP di semua jumlah user, sedangkan delay pada algoritma PF dan EXP/PF agak sedikit meningkat seiring bertambahnya jumlah user. pada trafik video, seperti yang ditunjukkan oleh gambar 19, algoritma EXP/PF dan FLS menghasilkan delay yang sangat kecil. Lain halnya dengan algoritma PF yang justru menghasilkan kenaikan nilai delay yang amat sangat signifikan pada setiap penambahan jumlah user.

Throughput: Pada gambar 20 terlihat bahwa nilai throughput untuk algoritma FLS pada trafik BE cenderung mengalami penurunan yang signifikan seiring bertambahnya user, dibandingkan dengan algoritma PF dan EXP/PF yang cenderung konstan untuk jumlah user 16, 28, dan 40. Nilai throughput pada layanan VoIP untuk semua algoritma, rata-rata semakin tinggi seiring bertambahnya user. untuk video, algoritma FLS menghasilkan nilai throughput yang semakin membesar di setiap penambahan user. Hal ini berbanding terbalik dengan algoritma PF, yang justru nilai throughputnya semakin mengecil.

Fairness: untuk trafik BE, nilai fairness ketiga algoritma sama untuk jumlah user 4 yaitu 0,25. Untuk jumlah user berikutnya, nilai fairness algoritma FLS untuk jumlah user 40 lebih tinggi dibanding jumlah

user 16 dan 28.pada algoritma EXP/PF dan PF nilai fairness tidak jauh berbeda untuk jumlah user 16, 28, dan 40. Pada gambar 24 dapat dilihat bahwa untuk trafik VoIP, nilai fairness ketiga algoritma sama untuk jumlah user 4. Untuk jumlah user berikutnya, nilai fairness ketiga algoritma tidak menentu. Untuk trafik video seperti ditunjukkan oleh gambar 25, nilai fairness ketiga algoritma sama pada jumlah user 4. Untuk jumlah user berikutnya, nilai fairness pada algoritma FLS cenderung konstan, sedangkan pada algoritma PF nilai fairnessnya berkurang drastis.

Packet Loss Ratio: pada gambar 26 terlihat bahwa packet loss ratio pada trafik Best Effort untuk algoritma FLS cenderung menurun sampai pada jumlah user 28 dan naik sedikit di jumlah user 40, begitu pula dengan algoritma PF dan EXP/PF. Pada trafik VoIP, nilai PLR sangat tinggi untuk algoritma FLS dan user 4. PLR untuk algoritma EXP/PF tertinggi untuk jumlah user 40. Sedangkan PLR untuk algoritma PF 0 % di jumlah user 4 dan 16 lalu meningkat di jumlah user 40. Pada trafik video, seperti ditunjukkan gambar 28, PLR ketiga algoritma untuk user 4 sangat kecil. Untuk jumlah user berikutnya, PLR pada algoritma PF cenderung meningkat secara signifikan.

8. Kesimpulan dan saran

8.1 kesimpulan

Dari hasil analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Performansi QoS ketiga algoritma secara umum tidak jauh berbeda, baik

pada kecepatan 3 Km/jam maupun pada kecepatan 30 km/jam.

2. Algoritma FLS secara keseluruhan menunjukkan performa QoS yang lebih bagus pada trafik data real-time seperti video.
3. Algoritma PF secara keseluruhan menunjukkan performa QoS yang buruk pada trafik data real-time sehingga kurang cocok apabila diterapkan untuk menangani trafik video.
4. Algoritma PF secara keseluruhan menunjukkan performa QoS yang bagus apabila diterapkan untuk menangani data non real-time seperti BE.
5. Untuk trafik multimedia dengan banyak user, lebih tepat menggunakan algoritma FLS, karena menyajikan performa yang baik pada parameter delay, throughput, dan packet loss ratio.

8.2 saran

Untuk penelitian selanjutnya, berikut saran yang penulis berikan:

1. Membandingkan performansi algoritma FLS dengan algoritma penjadwalan lain yang lebih baru.
2. Melakukan analisis pada algoritma FLS dengan user diatas 50 pada skenario *singlecell*.
3. Melakukan analisis pada algoritma FLS dengan kecepatan yang lebih tinggi, misalnya di atas 100 km/jam pada skenario *multicell*.

9. Daftar Pustaka

- [1] Biswapratap Singh Sahoo."Performance Comparison of Packet Scheduling Algorithms for Video Traffic in LTE Cellular Network". International Journal of Mobile Network Communication & Telematics (IJMNCT) Vol. 3, No. 3, June 2013.
- [2] E. Liu and K.K Leung. "Throughput of proportional fair scheduling over Rayleigh fading channels". Electronics letters 5th November 2009 Vol.45 No.23.
- [3] Giuseppe Piro, Luigi Alfredo Grieco, Gennaro Boggia, Francesco Capozzi, and Pietro Camarda."Simulating LTE Cellular Systems: an Open Source Framework". IEEE Trans. VEH. Technol., Oct. 2010.
- [4] Giuseppe Piro, Luigi Alfredo Grieco, Gennaro Boggia, Francesco Capozzi, and Pietro Camarda."Two-level downlink scheduling for real-time multimedia services in LTE networks". IEEE.
- [5] Huthaifa Al-Jaradat and Kumbesan Sandrasgaran."On the Performance of PF, MLWDF, and EXP/PF Algorithms in LTE". International Journal of Computers and Technology Vol.8, No 1, June 2013.
- [6] Kapseok Chang, Youngnam Han. "QoS based adaptive scheduling for a mixed service in HDR system". IEEE
- [7] [Http://4g-lte-world.blogspot.com/2013/01/quality-of-service-qos-in-lte.html](http://4g-lte-world.blogspot.com/2013/01/quality-of-service-qos-in-lte.html)
- [8] [Http://www.teletopix.org/4g-lte/access-the-lte-network/](http://www.teletopix.org/4g-lte/access-the-lte-network/)
- [9] The LTE Network Architecture (A comprehensive tutorial) by Alcatel.
- [10] Tolga Girici, Chen xi Zhu, Jonathan R. Agre, and Anthony Epremedes ."Proportional Fair Scheduling Algorithm in OFDMA-Based Wireless Systems with QoS Constraints". Journal of Communication and Networks, Vol.12, No 1, February 2010.
- [11] Yaser Barayan and Ivica Kostanic."Performance Evaluation of Proportional Fairness Scheduling in LTE". Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2013 Vol II WCECS 2013, 23-25 October, 2013, San Francisco, USA.