

TINJAUAN ANALISIS PERFORMANSI TRAFIK KANAL PADA LAYANAN VOIP

Y. Bandung¹, S.N.M.P. Simamora²

^{1,2}*Sekolah Teknik Elektro dan Informatika (STEI),
Institut Teknologi Bandung (ITB), Jl. Ganesha No. 10, Bandung 40132, Indonesia
Email : bandung@stei.itb.ac.id¹, sihar_st@students.ee.itb.ac.id²*

ABSTRACT

Data communication paths in a network the Internet can be modeled as a queue channel, ie when data traffic on the channel will be formed to increase so the data queue waiting to be served by the system. In this paper will discuss the analysis of the traffic intensity, time of service, and service loads. Voice over Internet Protocol (VoIP) is one form of service delivery of data packets on the Internet is the voice signal is encoded into bits of data are transmitted through the transmission medium. Thus, the nature and conditions apply to all traffic data services regardless of type and media-channel data transmission even going and being occupied. Service model commonly used and work on a VoIP service is first-come-first served, so the value of the first ring waiting time depends on the time of service at the destination node to receive calls.

Keywords—Channel-Traffic, VoIP, Services-Load, Service-Time

ABSTRAK

Jalur komunikasi data di jaringan Internet dapat dimodelkan sebagai suatu saluran antrean, yaitu apabila trafik data di dalam saluran mengalami peningkatan maka akan terbentuk antrean data yang menunggu untuk dilayani oleh sistem. Di dalam makalah ini akan dibahas analisis hubungan intensitas trafik, waktu pelayanan, dan beban layanan. Voice over Internet Protocol (VoIP) merupakan salah satu bentuk layanan pengiriman paket data di jaringan Internet yaitu sinyal suara dikodekan menjadi bit-bit data yang disalurkan melalui media transmisi. Dengan demikian sifat dan kondisi trafik berlaku untuk semua layanan data tanpa melihat jenis dan media-transmisi bahkan kanal data yang akan dan sedang diduduki. Model layanan yang digunakan dan umum bekerja pada layanan VoIP adalah first-come-first served, sehingga nilai waktu tunggu dering pertama bergantung pada waktu layanan pada node yang dituju untuk menerima panggilan.

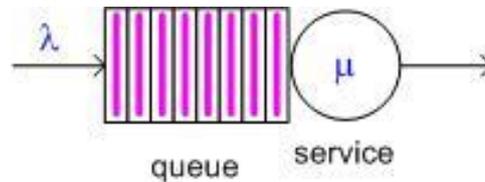
Kata Kunci—Trafik Kanal, VoIP, Beban Layanan, Waktu Layanan

PENDAHULUAN

Salah satu faktor yang mempengaruhi hasil performansi suatu layanan jaringan adalah trafik. Trafik dalam jaringan merupakan intensitas kedatangan *packet-data* yang melewati kanal jaringan dalam periode interval waktu tertentu[1]. Apabila pada suatu kanal jaringan nilai trafik mengalami peningkatan maka dapat dikatakan bahwa terjadi peningkatan trafik pada kanal jaringan tersebut. Naik-turunnya trafik kanal bergantung kepada volume kedatangan *packet-data* yang ditransmisikan dari *node* asal ke *node* tujuan pada kanal jaringan. Jika pada kanal jaringan telepon nilai trafik dilihat dari jumlah panggilan yang masuk atau dibangun, maka pada jaringan komunikasi data, trafik dilihat dari jumlah *packet-data* yang datang menduduki kanal jaringan. Dengan demikian ukuran trafik pada kanal jaringan komunikasi data dapat direpresentasikan dalam jumlah *packet-*

data yang datang dan pergi seperti pada jalur antrian; sehingga pola trafik kanal pada jaringan komunikasi data dapat dimodelkan dalam antrian.

Gambar 1 menunjukkan skema antrian untuk pola disipin *First-Come-First-Served* (FCFS). Notasi λ melambangkan laju kedatangan paket data yang masuk ke dalam sistem, dan notasi μ melambangkan laju pelayanan paket data oleh sistem. Jika laju kedatangan paket data melebihi laju pelayanan, maka akan terjadi antrean yang biasanya ditampung ke dalam sebuah *buffer* atau memori. Laju kedatangan diilustrasikan seperti tingkat kelahiran, sedangkan laju kepergian setelah proses layanan selesai diilustrasikan seperti tingkat kematian.

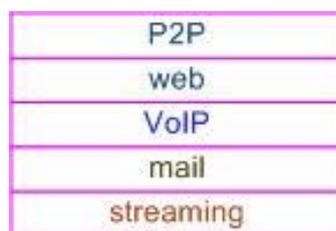


Gambar 1. Skema Antrian Untuk Pola First-Come-First-Served

Namun hal menarik muncul apabila *packet-data* pada trafik kanal tersebut merupakan sinyal suara yang berasal dari layanan VoIP pada jaringan komunikasi data. Dengan kata lain, trafik kanal dinyatakan dalam jumlah panggilan yang masuk atau yang dibangun menuju *node* tujuan atau jumlah kedatangan suatu *packet-data* yang menduduki kanal jaringan. Setiap *packet-data* dinyatakan dalam sekumpulan entitas-entitas yang datang secara beruntun dan sekuensial menuju regional dengan kapasitas tertentu. Oleh sebab keterbatasan kapasitas pelayanan menyebabkan entitas-entitas tersebut harus menunggu untuk dilayani. Apabila jumlah kedatangan melebihi kapasitas yang dimiliki oleh kanal maka akan menyebabkan *congestion*. Hal inilah yang umum terjadi pada kanal data apabila jumlah *packet-data* yang datang melebihi kapasitas kanal yang tersedia.

Dalam penelitian ini hal yang dikaji adalah pendekatan secara sintetik perihal tinjauan analisis kinerja trafik kanal untuk layanan VoIP. Pendekatan dilakukan melalui beberapa makalah yang mengkaji persoalan yang serumpun dengan tujuan mendapatkan uraian analitik yang konstruktif dan baik.

Dalam kondisi kanal data yang diduduki sama, *data-rate* pada tipe data dari kiri ke kanan semakin kecil untuk: *text*, *audio*, *image*, *video*[2]. Dengan demikian layanan VoIP tergolong *audio* dan memiliki *data-rate* di antara *text* dan *image* terlebih *video*. Sehingga penelitian di dalam [3] mengelompokkan beberapa layanan seperti pada Gambar 2 untuk tiap *data-rate* data pada kanal yang sama yang diduduki, dengan catatan semakin ke bawah nilai *data-rate* semakin kecil.



Gambar 2. Hirarki Data-Rate Pada Beberapa Layanan Aplikasi

METODE PENELITIAN

Dalam pengerjaan riset ini, pendekatan yang dilakukan adalah menggunakan studi literatur dan melakukan perbandingan hasil dan kajian yang sejenis dari beberapa penelitian lain yang telah dilakukan. Di samping itu, di dalam penelitian ini juga dilakukan beberapa simulasi menggunakan aplikasi Wireshark untuk mendapatkan hasil pengamatan terhadap parameter *delay* atau waktu tunda.

Walaupun diakui bahwa *delay* pada sinyal analog (sinyal kontinyu) antara *transmitter-recvier* tidak identik pada *packet-data* dalam kanal komunikasi data, namun harus diingat bahwa sinyal *speech* pada layanan VoIP akan dikode-dekodekan dalam format *packet-data*, sehingga dapat diamati parameter *delay*. *Delay* yang diamati tersebut dilakukan pada periode tertentu terhadap *node* asal ke *node* tujuan saat dilakukannya panggilan komunikasi.

Hal yang belum dilakukan di dalam penelitian ini adalah mengukur nilai μ , ϕ , dan β pada satu kondisi yang sama, melainkan mendefinisikan ketiga parameter tersebut menggunakan hasil penelitian dari makalah yang mengkaji QoS (kualitas layanan). Parameter β dapat diidentikkan dengan parameter *delay* yang diamati menggunakan Wireshark pada dua *node* yang saling membangun panggilan komunikasi. Jika *delay* teramati meningkat, maka dapat diindikasikan trafik kanal yang terjalin antar *node* yang sedang membangun komunikasi data mengalami peningkatan. Untuk mengukur ϕ dilakukan dengan cara mengamati beban proses yang dilayani oleh terminal *end-user* yang diamati. Sederhananya pada sistem operasi Windows dengan melihat Task-Manager saat periode pengamatan dilakukan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada kondisi intensitas trafik yang tinggi, waktu layanan semakin lama dan beban layanan semakin tinggi; jika trafik tinggi direpresentasikan dengan β , waktu layanan adalah μ , dan beban layanan adalah ϕ ; maka hubungan ketiganya berlaku secara langsung dan linier. Maksudnya adalah ketiga parameter tersebut saling mempengaruhi apabila salah satu dari ketiga mengalami perubahan signifikan.

Ketiga parameter ini dapat dibangun hubungannya sebagai berikut [3][5]:

$$\beta + \phi = \mu \quad (1)$$

Diasumsikan:

β_{A-B} : trafik kanal yang diamati selama periode tertentu antara *node-A* ke *node-B* dengan melihat parameter *delay* pada Wireshark; *delay* semakin besar mengindikasikan trafik tinggi.

ϕ_B : beban layanan yang diamati pada *node-B* saat panggilan komunikasi berlangsung, dimana metode yang digunakan misalkan dengan melihat Task Manager pada sistem operasi Windows *node* yang diamati (dalam hal ini *node* tujuan)

μ_B : waktu layanan pada *node-B* saat menerima panggilan dari *node* lain dimana direpresentasikan dalam parameter waktu tunggu dering pertama [7]

Kesulitan untuk mendapatkan ketiga parameter ini adalah *tools* yang tersedia, dan jika dilakukan dengan cara pengamatan maka dibutuhkan lebih dari dua orang pengamat; dan bila dilakukan pengamatan dilakukan secara manual maka sifat bias yang didapatkan tidak dapat dihindari.

Pendekatan lain dapat dilakukan sebagai berikut:

Jika berdasar [8] didapatkan hubungan:

$$\text{throughput}_{\text{kanal}} = \frac{\sum \text{packet_data}}{\text{delay}_{\text{transmisi}}} \quad (2)$$

Nilai β diidentikkan dengan $\frac{1}{\text{throughput}_{\text{kanal}}}$, dimana *throughput* kanal data jika semakin besar

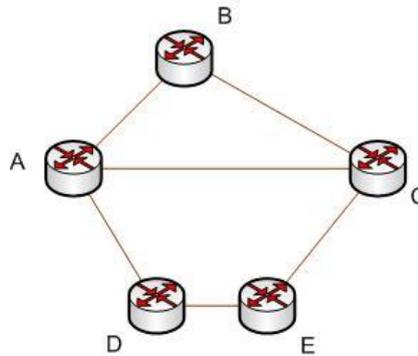
mengindikasikan trafik kanal semakin kecil. Selanjutnya untuk nilai ϕ identik dengan $\Sigma \text{packet-data}$, dimana $\Sigma \text{packet-data}$ berhubungan langsung dengan beban proses yang akan dikerjakan oleh sebuah *node* terminal jaringan; serta μ senilai dengan nilai t_{delay} .

Sehingga di satu sisi ketiga parameter β , ϕ , μ dapat disusun hubungannya sebagai berikut:

$$\frac{1}{\beta} = \frac{\phi}{\mu} \quad (3)$$

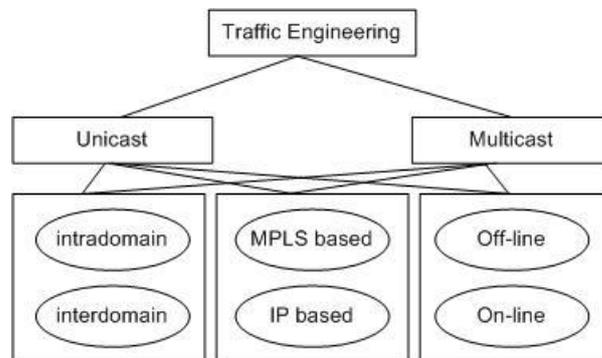
Relevansi (1) dan (3) masih dibutuhkan penelitian lebih lanjut.

Misalkan diperlihatkan pada Gambar 3, proses *routing* dilakukan ketika trafik yang didapatkan mengalami peningkatan sehingga dialihkan ke rute lain [4]. Jika komunikasi VoIP yang dibangun antara A dan C namun didapatkan trafik padat pada saluran antara A dan C, maka alternatif *routing* yang dapat dilakukan melalui A-B-C atau A-D-E-C. Artinya beban layanan (ϕ) adalah sama untuk A-B-C ; A-C ; A-D-E-C jika didapatkan β mengalami peningkatan pada A-C walaupun *cost* transportasi rendah antara A dan C dibandingkan dengan *routing* yang lain.

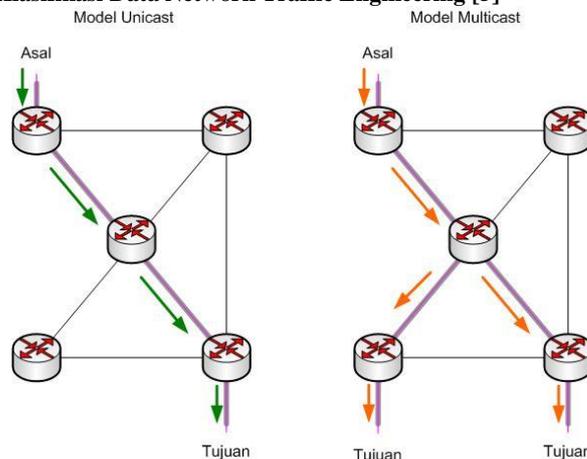


Gambar 3. Peta Routing Pada Jaringan Komunikasi Data

Nilai β dipengaruhi oleh proses komputasi pada *node* C; bahkan apabila *node* secara *parallel tasking* terhubung ke jaringan lain, yakni jaringan privat atau jaringan publik. Jika pada jaringan publik, berdasar penelitian pada [5] untuk layanan VoIP terdapat perbedaan secara hirarki antara model *unicast* dan *multicast* seperti terlihat pada Gambar 4 dan 5 berikut ini:



Gambar 4. Hirarki Untuk Klasifikasi Data Network Traffic Engineering [5]



Gambar 5. Peta Routing Pada Jaringan Komunikasi Data Unicast Dan Multicast [5]

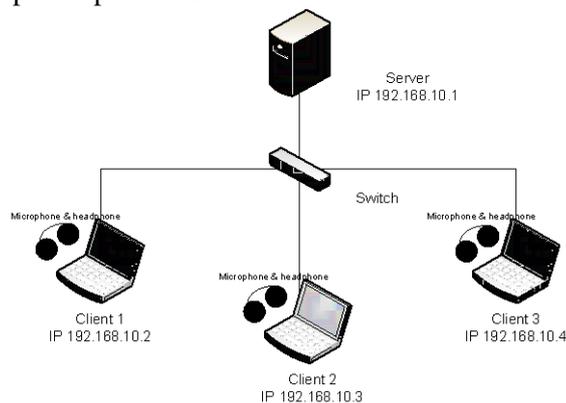
Dengan demikian berdasar Gambar 4, layanan VoIP berlaku pada *unicast* dan *multicast* dengan masing-masing sub-domain di dalamnya dan saling berpengaruh satu dan dengan yang lain. Hal ini disebabkan sinyal *speech* pada VoIP akan dikode-dekodekan melalui CODECs yang digunakan dalam *packet-data*, sehingga *packet-data* yang berjalan dan mengalir tak lain adalah format tipe data *audio*; sehingga berlaku pada tipe data lainnya dalam jaringan komunikasi data [6].

Seperti yang telah dijelaskan berdasar (1) dan (3) sebelumnya bahwa ϕ meningkat seiring dengan peningkatan intensitas nilai μ ; dan β sendiri secara fisik dapat terdeskripsikan dengan jumlah *path* yang terkoneksi kepada *node* tujuan, seperti terlihat pada Gambar 8 [8].

Tabel 1. Nilai μ Berdasar Gambar 6 [7]

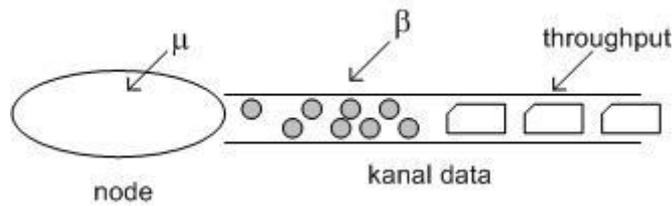
Nama Client	μ (detik)
client-1 (192.168.10.2) → client-2 (192.168.10.3)	1.47
	1.25
	1.17
client-2 (192.168.10.3) → client-1 (192.168.10.2)	1.21
	1.44
	1.31
client-1 (192.168.10.2) → client-3 (192.168.10.4)	1.47
	1.43
	1.54
client-3 (192.168.10.4) → client-1 (192.168.10.2)	1.23
	1.33
	1.19
client-2 (192.168.10.3) → client-3 (192.168.10.4)	1.49
	1.32
	1.28
client-3 (192.168.10.4) → client-2 (192.168.10.3)	1.44
	1.19
	1.30

Diperlihatkan pada Gambar 6, suatu jaringan VoIP yang dibangun dari tiga *user-agent* dan satu sentral dengan satu buah *backwarding/forwarding devices* menggunakan *switch*. Seperti diketahui bahwa prinsip *switch* menggunakan model *multicast*, sehingga komunikasi data yang dibangun dari *node* asal dan *node* tujuan sudah pasti dan tertentu sinyal yang dibangun. Berdasar skenario yang ditetapkan, dilakukan proses pembangunan panggilan antar *node* yang tersambung dalam jaringan VoIP; serta hasilnya ditampilkan pada Tabel 1.

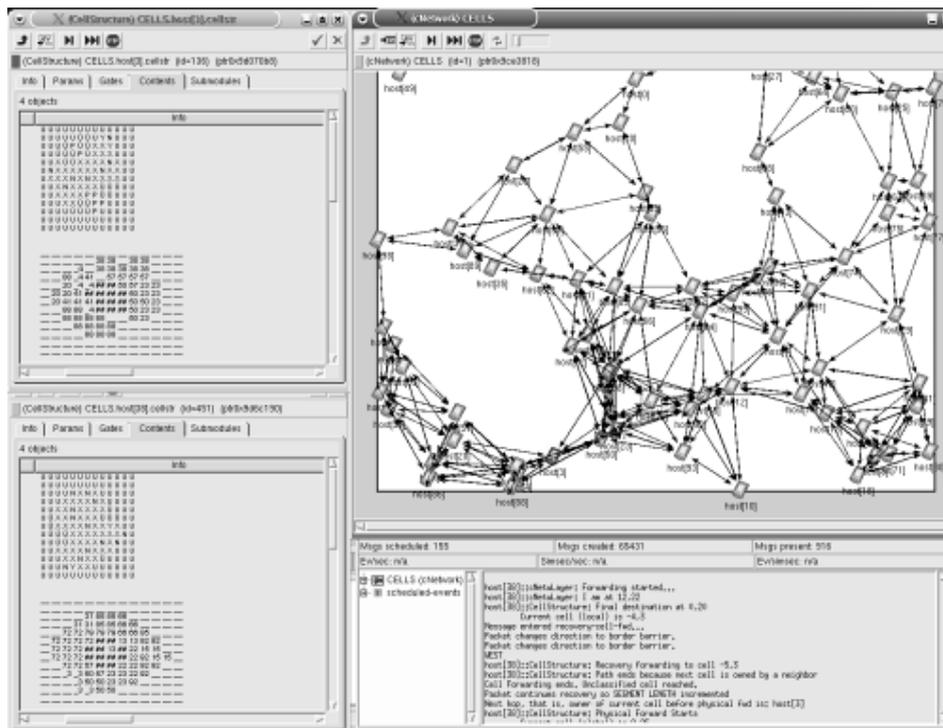


Gambar 6. Arsitektur Jaringan Pada Layanan VoIP[7]

Sedangkan pada Gambar 6 menampilkan model antrian saat kanal data diduduki oleh sejumlah panggilan sehingga berdasar [5], perubahan intensitas nilai μ dan β mempengaruhi *throughput* kanal data yang akan diduduki oleh kedatangan *packet-data* selanjutnya.



Gambar 7. Pengaruh Intensitas Nilai μ Dan β Terhadap Nilai Throughput Kanal



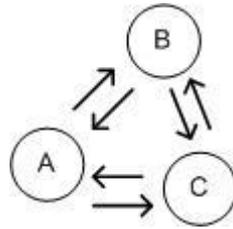
Gambar 8. Sebanyak N-Connections Dibangkitkan Menuju Node Tujuan Disimulasikan Menggunakan OMNET [8]

Berdasar [8] didapatkan hubungan *data-rate* terhadap *throughput* berdasar Gambar 9. Seperti ditunjukkan pada Tabel 2 dan Gambar 9. Hal ini juga berdasar Gambar 2, yaitu semakin besar *throughput*, maka nilai *data-rate* menjadi semakin besar. Namun besar-kecilnya nilai *data-rate* bergantung kepada besar-kecilnya ukuran data dan jenis/tipe datanya.

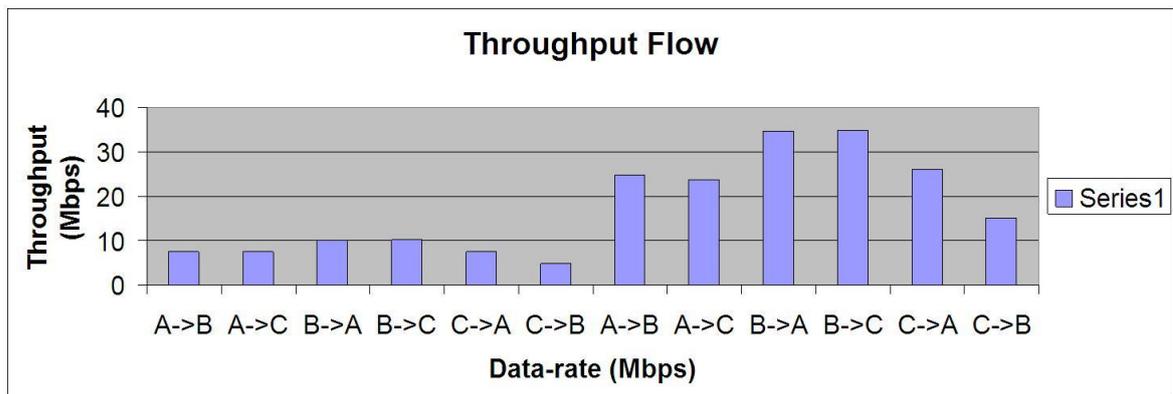
Tabel 2. Data-rate v.s throughput berdasar aliran data antar node berdasar gambar 9

Data-rate (Mbps)		Rute antar node	Throughput (Mbps)
		53.3	A->B
	A->C	7.47	
	B->A	10	
	B->C	10.2	
	C->A	7.5	
	C->B	4.8	
200	A->B	24.8	
	A->C	23.8	
	B->A	34.6	
	B->C	34.9	
	C->A	26.1	
	C->B	15.1	

Pada Gambar 9, *data-rate* yang diskenariokan menggunakan dua nilai yakni: 53.3 dan 200; dimana masing-masing antar *node* dilakukan pengujian keseluruhan. Dan berdasar Tabel 2, didapatkan peningkatan signifikan pengaruh *data-rate* terhadap *throughput* yang didapatkan.

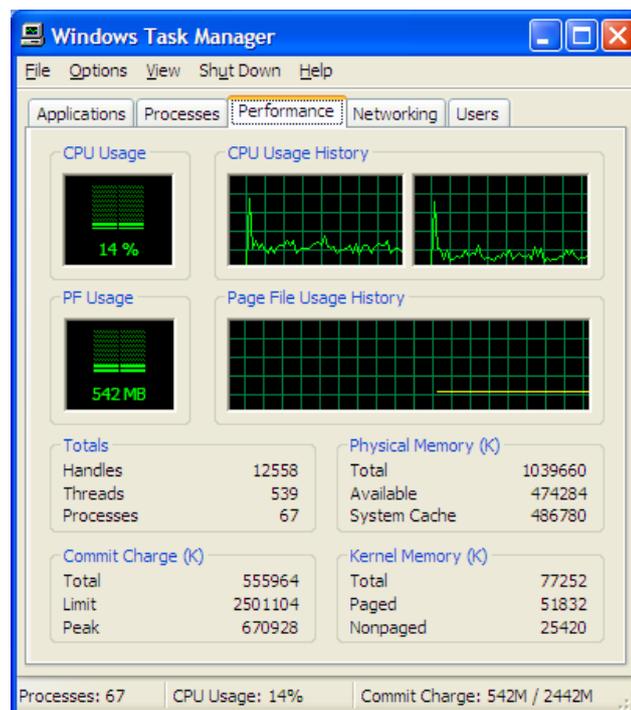


Gambar 9. Rute Aliran Antar Node [8]



Gambar 10. Grafik Perbandingan Nilai Data-Rate Terhadap Throughput [8]

Dalam hubungan *data-rate* terhadap *throughput* yang diperlihatkan pada Gambar 10 menunjukkan bahwa nilai *throughput* mengalami fluktuasi berdasar trafik kanal pada saat komunikasi sedang berlangsung; dengan catatan bahwa berdasar (3) trafik semakin besar maka *throughput* semakin kecil untuk satu periode waktu tertentu.

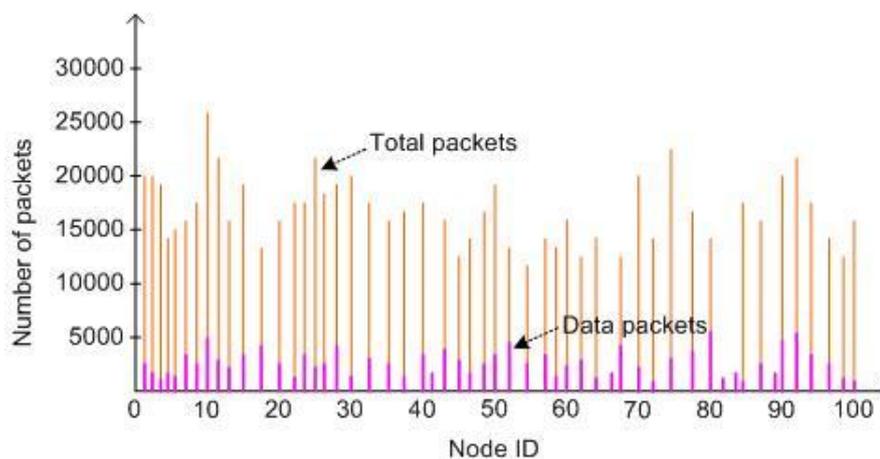


Gambar 11. Nilai ϕ Yang Direpresentasikan Dalam Pengamatan Beban Proses Pada Suatu Node

Demikian disajikan pada Gambar 12 berdasar [9] yang memperlihatkan perihal hubungan sejumlah *packet-data* yang mengalir untuk setiap pertambahan jumlah *node*; dan terlihat perbandingan antara *data-packet* yang teramati terhadap total *packet-data* yang berjalan saat periode pengamatan. Bila dilihat pada Gambar 12, bahwa rasio perbandingan relatif 2 s.d. 3 kali *packet-data* yang teramati untuk setiap pertambahan jumlah *node* yang aktif pada cakupan jaringan komunikasi data tersebut.

Dan pada Gambar 12 dapat dijelaskan juga bahwa intensitas trafik bergantung pada jumlah panggilan yang sedang menduduki kanal data bukan bergantung pada jumlah *node* eksis yang ada dan aktif pada jaringan tersebut. Dengan kata lain juga dapat disebutkan bahwa jumlah panggilan yang sedang menduduki kanal data dapat disebutkan juga sebagai jumlah *request* yang dibangun untuk dilayani. Artinya bila kembali dilihat pada Gambar 8, apabila jumlah suatu *path* yang muncul dan eksis pada jaringan telah mendekati 100, maka kemungkinan intensitas trafik yang muncul lebih besar atau sama dengan 100; karena satu *path* yang muncul dan eksis pasti memunculkan satu *line* komunikasi data atau *request* layanan. Padahal satu *path* bisa berisikan lebih dari satu *line* komunikasi data atau *request* layanan.

Demikian juga pada VoIP, yaitu kanal data yang dilalui oleh VoIP tidak serta-merta berisikan hanya satu *line* komunikasi VoIP, melainkan *mixed* atau bercampur dengan *line* komunikasi atau *packet-data* lain. Sehingga trafik yang dimiliki pada saluran komunikasi yang dilalui oleh VoIP lebih lebar dibandingkan dengan saluran *voice* pada kanal telepon dan membutuhkan lebar saluran lebih dibandingkan kanal komunikasi data umumnya. Hal inilah yang menjadi salah satu indikator untuk meningkatkan QoS layanan VoIP dan pada kanal/saluran komunikasi VoIP.



Gambar 12. Intensitas Trafik Yang Berjalan Pada Sejumlah Node

Oleh sebab itu dapat disebutkan bahwa trafik kanal data dapat didefinisikan sebagai besar lalu-lintas *packet-data* yang eksis pada suatu saluran/kanal yang menyebabkan nilai *throughput* kanal menjadi kecil. Namun pengaruh trafik kanal data tidak menyebabkan pengaruh signifikan terhadap *data-rate* suatu data yang berjalan [10]. Hubungan dan relasi ini sangat menarik untuk dikaji pada penelitian berikutnya.

Pada Tabel 3 diperlihatkan pengaruh trafik kanal pada dua parameter *average holding time* (AHT) dan *average inter arrival time* (AIT) pada setiap selang satu jam pengamatan, dimana AIT diamati untuk antar dua panggilan yang datang.

Tabel 3. Nilai AIT dan AHT Pada Selang Pengamatan Satu Jam[10]

Hour	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00
AIT (in sec)	5.65	3.64	2.32	8.84	9.21
AHT (in sec)	325.2	345.2	123.74	165.54	322.54

Berdasar [10], *average holding time* (AHT) merupakan perbandingan total waktu panggilan terhadap jumlah panggilan, yakni:

$$\text{AHT} = \frac{\text{total_call_time}}{\text{amount_of_calls}} \quad (4)$$

AHT berjalan secara distribusi eksponensial [10], sehingga kenaikan dan penurunan nilai AHT berjalan secara dinamis dimana kemungkinan pada *state* tertentu berada pada nilai konstan.

Sedangkan *average inter arrival time* adalah rata-rata selang waktu panggilan yang masuk antar dua panggilan pada *node* tujuan. Pada kanal VoIP, nilai AIT dipengaruhi oleh waktu tunggu dering pertama, t_x . [7]; dan t_x dipengaruhi oleh trafik kanal.

Jika waktu tunggu dering pertama dinyatakan dalam t_x , maka besarnya bergantung kepada waktu layanan pada *node* tujuan saat menerima panggilan dari *node* lain; sehingga besar t_x relatif sama dengan μ ; dengan asumsi metode layanan menggunakan disiplin *First-Come-First-Served* (FCFS).

KESIMPULAN

Trafik kanal berlaku umum pada semua jaringan, baik berdasarkan *telephony* maupun *data-communication*; baik dengan menggunakan media *wireless* atau *wireline*. Trafik kanal bergantung kepada intensitas *packet-data* yang menduduki suatu kanal data. Jika jumlah kedatangan paket data melebihi kapasitas kanal yang tersedia, maka akan terbentuk antrean paket data yang menunggu untuk dilayani.

Trafik kanal pada layanan VoIP identik dengan tipe data audio, hal ini dapat dijelaskan dengan cara menggunakan teknik CODEC pada VoIP sehingga sinyal *speech* dikode-dekodekan ke dalam bentuk *packet-data*, sehingga identik dengan tipe data *audio*.

Hubungan intensitas trafik terhadap waktu layanan dan beban layanan bersifat langsung, saling mempengaruhi dan linier, sehingga parameter satu dengan yang lainnya berlaku secara *real-time* dan langsung secara signifikan.

SARAN

Parameter β , ϕ , μ perlu dilakukan penelitian lebih lanjut khususnya diuji dalam dua atau lebih skenario dan kasus pengujian agar membuktikan teori serta hipotesis yang telah dikembangkan. Dan diharapkan, ketiga parameter diuji pada jaringan komunikasi data *real*.

Pengembangan selanjutnya akan dilakukan pada mode arsitektur jaringan VoIP heterogen yakni *PSTN-to-computer* untuk melihat perbandingannya dengan mode arsitektur jaringan VoIP *computer-to-computer*. Terlebih lagi apabila pengalamatan yang digunakan adalah IPv6 untuk melihat pengaruh terhadap trafik kanal apabila menggunakan pengalamatan alternatif selain IPv4.

DAFTAR RUJUKAN

- A. Nascimento, S. Queiroz, E. Mota, L. Galvão, E. Nascimento. "Influence of Routing Protocol on VoIP Quality Performance in Wireless Mesh Backbone". *Prosiding The Second International Conference on Next Generation Mobile Applications, Services, and Technologies*, 2008: hal. 450-455.
- J. Seger. "Modelling Approach for VoIP Traffic Aggregations for Transferring Tele-traffic Trunks in a QoS enabled IP-Backbone Environment". The International Workshop on Inter-domain Performance and Simulation (IPS). Salzburg, Austria, 20-21 February, 2003.
- K. H. Ho, N. Wang, P. Trimintzios, G. Pavlou, M. Howarth. "On Egress Router Selection for Inter-domain Traffic with Bandwidth Guarantees". *Proceedings Workshop on High Performance Switching and Routing*, 2004. HPSR. 2004: hal. 337-342
- K. H. Ho, M. Howarth, N. Wang, G. Pavlou, S. Georgoulas. "Two Approaches to Internet Traffic Engineering for End-to-End Quality of Service Provisioning". *Proceedings Next Generation Internet Networks*, 2005: hal. 135-142.

- K. H. Ho, G. Pavlou, M. Howarth, N. Wang. "An Incentive-based Quality of Service Aware Algorithm for Offline Inter-AS Traffic Engineering". *Proceedings IEEE Workshop on IP Operations and Management*, 2004: hal. 34-40.
- N. Wang, K. H. Ho, G. Pavlou, M. Howarth. "An Overview of Routing Optimization for Internet Traffic Engineering". *The 1st quarter 2008*, Vol. 10 No.1: hal. 36-56.
- S.N.M.P. Simamora, T. Juhana, Kuspriyanto, W. Ardianita. "Analisis Sistem Waktu-Nyata pada Komunikasi Full-duplex untuk Jalur Komunikasi Data", *Proceeding of Conference The Annual Discovery in ICT-M (ADICT)*, 19 Desember 2012. Politeknik TELKOM. Bandung. ISSN: 2302-1896
- S.B. Lee. "*Adaptive Quality of Service for Wireless Ad hoc Networks*". Ph.D Dissertation. Columbia University. 2006.
- V. Rajendran. "*Medium Access Control Protocol for Multi-Hop Wireless Ad-hoc Networks*". Ph.D Dissertation. University of California, Santa Cruz. 2006.
- Y. Shavitt, Y. Singer. "Limitations and Possibilities of Path Trading between Autonomous Systems". *Proceedings IEEE INFOCOM*, 2010: hal. 1-9.