

# Implementasi dan Analisis Metode *Hierarchical Token Bucket* dan *Per Connection Queue* pada Jaringan *Multi Protocol Label Switching Traffic Engineering* untuk Layanan *Voice over Internet Protocol*

<http://dx.doi.org/10.28932/jutisi.v4i3.894>

Anggayasti Ariane Zuqhra<sup>#1</sup>, Nur Rohman Rosyid<sup>\*2</sup>

<sup>#</sup> *Teknologi Rekayasa Internet, Departemen Teknik Elektro dan Informatika, Sekolah Vokasi, Universitas Gadjah Mada Bulaksumur, Yogyakarta 55281*

<sup>1</sup>anggayastiz@gmail.com

<sup>\*</sup> *Teknologi Rekayasa Internet, Departemen Teknik Elektro dan Informatika, Sekolah Vokasi, Universitas Gadjah Mada Bulaksumur, Yogyakarta 55281*

<sup>2</sup>nrohmanr@gmail.com

**Abstract** — In growing industrial era, communication technology through IP network is becoming vital for supporting enterprises productivities. One of high performance communications that is used nowadays is VoIP (Voice over Internet Protocol). VoIP is able to do remote communication without spending high fees. Alongside with high requirements of transmitting and receiving data packet in network, bandwidth management is necessary, so that the decreasing of network performance will not occur. Bandwidth management methods supported by MikroTik RouterOS are HTB (Hierarchical Token Bucket) and PCQ (Per Connection Queue). This research compared HTB and PCQ methods for stabilizing VoIP based on MOS (Mean Opinion Score) parameter and QoS (Quality of Service) parameters such as delay, jitter, throughput, and packet loss using MikroTik devices. In this research, VoIP was tested in MPLS-TE (Multi Protocol Label Switching Traffic Engineering) network. The advantages of TE in MPLS combined with bandwidth management method are maximizing the resources and services in a network and resulting good QoS. The result of this research is that the best QoS and MOS values are from MPLS-TE network using HTB method in normal condition and full bandwidth. In normal condition, the value of delay is 16,02 ms, jitter is 0,00000004 ms, 0% for packet loss, and 146,4 kbps for throughput. When bandwidth is full, delay is 40,567 ms, 0,000000073 ms for jitter, packet loss is 12,667%, and throughput is 58,2 kbps.

**Keywords**— HTB, MPLS TE, PCQ, QoS, VoIP

## I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi yang terus mengalami kemajuan

menyebabkan penggunaan yang meningkat. Berdasarkan survei yang dilakukan APJII pada tahun 2016, 62% dari 262 juta jiwa penduduk Indonesia yang menggunakan internet adalah pekerja [1]. Hal ini menunjukkan bahwa dunia pekerjaan sangat bergantung pada teknologi internet untuk menjalin komunikasi. Sistem komunikasi yang efektif dan efisien dalam perusahaan diperlukan untuk mengoptimalkan proses bisnis. Hubungan kantor pusat dengan kantor cabang yang secara geografis terpisah jauh perlu didukung oleh teknologi yang mampu mengoptimalkan QoS (*Quality of Service*) dalam sistem komunikasi.

Salah satu penunjang komunikasi dengan performa tinggi adalah VoIP (*Voice over Internet Protocol*) yang merupakan telepon yang menggunakan jaringan IP. Agar suatu trafik VoIP dapat berkerja dengan maksimal, diperlukan teknik *bandwidth management* dalam konfigurasi, salah satunya yakni *queuing*. Pada MikroTik RouterOS, teknik *queuing* terbagi atas *schedulers* dan *shapers*. Metode HTB (*Hierarchical Token Bucket*) dan PCQ (*Per Connection Queue*) termasuk ke dalam *packet shapers*.

Jaringan yang populer digunakan oleh *enterprise* saat ini adalah MPLS (*Multi Protocol Label Switching*) karena menyediakan *multi service*, performa yang tinggi, serta menawarkan fleksibilitas dan skalabilitas. MPLS menyediakan wilayah *connection-oriented* yang memungkinkan adanya *Traffic Engineering* (TE) pada jaringan [2].

Terdapat beberapa penelitian yang melakukan uji peforma MPLS *Traffic Engineering* baik yang dilakukan

menggunakan simulator maupun implementasi secara langsung. Salah satu simulator yang digunakan untuk melakukan uji performa yaitu OPNET Modeler [3], penelitian tersebut membandingkan model jaringan IP tanpa TE dengan MPLS-TE menggunakan OPNET Modeler. Parameter yang dibandingkan meliputi *throughput*, *end-to-end delay*, dan waktu respon FTP. Didapatkan bahwa jaringan MPLS-TE menghasilkan nilai parameter yang lebih baik. Untuk meningkatkan teknik pemilihan jalur pada model jaringan MPLS-TE, dapat menggunakan mekanisme *connectivity protection*, yaitu *Fast Reroute (FRR)*. MPLS-TE FRR ialah mekanisme link dan *node protection* dengan fitur *switch over* yang cepat dalam waktu yang singkat [4]. *Traffic Engineering* memiliki keandalan dalam *real-time forwarding* paket data. Hal ini sangat mendukung jaringan yang melewati trafik suara melalui IP (VoIP) [5]. Agar trafik tetap berjalan lancar, diperlukan adanya metode *bandwidth management* yang salah satu jenis tekniknya adalah *queuing*. Penelitian yang membandingkan antara *Class-Based Queue (CBQ)* dengan *Hierarchical Token Bucket (HTB)* untuk VoIP menyatakan bahwa HTB menghasilkan *delay* dan *jitter* yang lebih baik [6]. Selain HTB dan CBQ, terdapat PCQ (*Per Connection Queue*) yang mampu meningkatkan nilai QoS untuk trafik *video streaming* dan VoIP [7]. Namun HTB tetap menghasilkan performa yang lebih baik dikarenakan pembagian *bandwidth* didasarkan pada kebutuhan dan level prioritas [8].

Adapun tujuan dari penelitian ini yaitu mengimplementasikan HTB dan PCQ sebagai teknik *bandwidth management* untuk memaksimalkan layanan VoIP dalam jaringan, serta mengetahui pengaruh HTB dan PCQ pada jaringan MPLS *Traffic Engineering* untuk layanan VoIP.

Manfaat dari penelitian ini di antaranya adalah memberikan informasi mengenai penerapan metode HTB dan PCQ pada jaringan MPLS-TE untuk layanan VoIP, serta memberikan informasi tentang kinerja dan perbandingan teknik-teknik *bandwidth management*.

## II. TEORI PENDUKUNG

### A. Multi Protocol Label Switching (MPLS)

MPLS adalah teknologi arsitektur *network* yang pakatnya disampaikan pada jaringan *backbone* berkecepatan tinggi. Asas kerjanya menggabungkan beberapa kelebihan dari sistem komunikasi *circuit-switched* dan *packet-switched*. Paket-paket diteruskan dengan protokol routing seperti OSPF, IS-IS, BGP atau EGP. Protokol routing berada pada lapisan *network* dalam sistem OSI, sedangkan MPLS berada di antara lapisan *data link* dan *network* [9].

Prinsip kerja MPLS ialah menggabungkan kecepatan *switching* pada lapisan *data link* dengan kemampuan *routing* dan skalabilitas pada lapisan *network*. Cara kerjanya yaitu dengan menyelipkan label di antara *header* lapisan *data link* dan lapisan *network* pada paket yang diteruskan. Label dihasilkan oleh LSR (*Label Switching Router*) bertindak

sebagai penghubung jaringan MPLS dengan jaringan luar. Label berisi informasi mengenai ke mana paket harus dikirim. Kemudian paket diteruskan ke *node* berikutnya. Di *node* ini, label pada paket akan dilepas dan diberikan label baru yang berisi tujuan selanjutnya. Paket-paket ini diteruskan dalam jalur yang disebut LSP (*Label Switching Path*).

### B. Multi Protocol Label Switching Traffic Engineering (MPLS-TE)

MPLS-TE memungkinkan untuk membuat LSP di jaringan yang disebut MPLS-TE LSP (*TE tunnels*). *Head end* suatu *TE tunnels* mengontrol jalur yang ditempuh trafik ke tujuan tertentu. Metode ini lebih fleksibel dari pada *forwarding traffic* berdasarkan alamat tujuan saja. Mekanisme *autoroute* digunakan untuk membangun tabel *routing* menggunakan MPLS-TE LSP tanpa membentuk *mesh*. MPLS-TE mereservasi *bandwidth* pada jaringan saat membangun LSP. Reservasi *bandwidth* untuk LSP memperkenalkan konsep sumber daya yang dapat dikonsumsi ke dalam jaringan. Jika membangun TE-LSP yang menyediakan *bandwidth* karena LSP ditambahkan ke jaringan, TE-LSP dapat menemukan jalur di jaringan yang memiliki *bandwidth* yang tersedia untuk dipesan. Suatu pemesanan/reservasi dibuat di *control plane* saja [5].

### C. Voice over Internet Protocol (VoIP)

*Voice over Internet Protocol* atau yang juga disebut *internet telephony* merupakan sebuah integrasi jaringan data dan jaringan suara. Dapat didefinisikan bahwa VoIP adalah teknologi jaringan telepon yang menggunakan jalur komunikasi data sebagai media (TCP/IP). Cara kerjanya yaitu dengan mengubah suara (analog) menjadi bentuk digital sehingga dapat dilewatkan pada jaringan IP. Manfaat dari VoIP yaitu dapat mengurangi biaya operasional jaringan telepon biasa ketika melakukan komunikasi jarak jauh. Hal ini dikarenakan jaringan telepon berbasis IP dapat dibangun dalam infrastruktur yang telah ada dan tidak perlu membangun infrastruktur baru. Karena berbasis IP, maka komunikasi jarak jauh tidak memerlukan biaya mahal.

Sebuah paket VoIP tersusun atas *header* yang terdiri atas beberapa bagian dan *voice payload*. Fungsi dari masing-masing susunan paket VoIP adalah sebagai berikut:

- *IP header*: Berfungsi menyimpan informasi routing yang berguna dalam pengiriman paket ke destinasi tujuan. Dalam IP header terdapat ToS (*Type of Service*) yang memungkinkan paket suara mendapat perlakuan berbeda dengan paket yang tidak *real-time*.
- *UDP header*: *Header* ini tidak menjamin suatu paket mencapai tujuan, namun cocok digunakan pada aplikasi *voice real-time* yang sangat peka terhadap *delay* ataupun *latency*.
- *RTP header*: Bertugas melakukan *framing* dan segmentasi data yang bersifat *real-time*. Seperti UDP, RTP juga tidak mendukung reabilitas paket untuk sampai ditujuan.

- *Voice Payload*: Nilainya berdasarkan *codec* yang digunakan.

#### D. Konsep Bandwidth Management

*Bandwidth* adalah kapasitas atau daya tampung suatu *channel* komunikasi untuk dapat dilewati sejumlah trafik informasi atau data dalam satuan waktu tertentu dan dinyatakan dengan satuan *bit per second* (bps). *Bandwidth management* merupakan suatu cara untuk mengatur berbagai jenis jaringan dengan menerapkan layanan *Quality of Service* (QoS) untuk menetapkan tipe trafik jaringan [10]. Teknik *bandwidth management* dilakukan dengan: *scheduling algorithm*, *traffic shapping*, limitasi *bandwidth*, dan teknik antrian. Teknik tersebut dapat mengatur alokasi *bandwidth* untuk layanan *Voice over Internet Protocol* (VoIP) yang membutuhkan ketepatan waktu dalam pengiriman paket, pengiriman dengan *latency*, *jitter* yang rendah, dan *bandwidth* yang cukup [11].

Metode *bandwidth management* yang dapat diterapkan pada perangkat MikroTik di antaranya adalah HTB dan PCQ.

1) *Hierarchical Token Bucket (HTB)*: Teknik HTB membatasi trafik pada setiap klasifikasinya. Hal ini membuat *bandwidth* yang tidak terpakai dapat digunakan oleh klasifikasi lain yang lebih rendah. Terdapat dasar kelas hirarki dalam teknik antrian ini, yaitu: *root*, *inner*, dan *leaf*. Kelas *root* adalah puncak hirarki sebagai empat keluarnya semua trafik. Kelas *inner* memiliki posisi di antara kelas *root* dan *leaf* sehingga memiliki kelas induk dan kelas anak. Kelas ini menyampaikan informasi mengenai *bandwidth* yang lebih untuk dibagi ke kelas anak. Terakhir, terdapat kelas *leaf* yang berada dalam hirarki paling dasar. Kelas ini mengontrol lalu lintas di dalamnya. Pada metode ini, trafik yang datang mengalami klasifikasi menggunakan filter yang dilakukan dengan filterisasi servis, alamat IP, atau alamat jaringan sehingga diketahui jenis trafik dan prioritasnya. HTB menggunakan konsep token dan *bucket*. Token dihitung dalam satuan *byte per second*, sedangkan *bucket* adalah *buffer* yang dikalkulasikan dari *max-limit*. *Max-limit* merupakan jumlah maksimum *bandwidth* yang akan didapat ketika alokasi *bandwidth* jaringan tidak terpakai. Diibaratkan bahwa token adalah koin dan *bucket* adalah keranjang. Ketika keranjang telah terisi penuh koin, koin tersebut dibagikan kepada yang membutuhkannya. Pemberian koin ini ialah penambahan *bandwidth* pada user yang membutuhkan. Di sinilah letak konsep *parent class* dan *child class*. Tambahan *bandwidth* tidak ada lagi apabila *bucket* tak lagi memiliki token [12].

2) *Per Connection Queue (PCQ)*: PCQ membagi *bandwidth* sama rata. Kinerja PCQ yaitu dengan membuat *sub-stream* berdasarkan parameter *pcq-classifier* yang berupa alamat IP pengirim, alamat IP tujuan, *port* pengirim maupun *port* tujuan. *pcq-classifier* berguna dalam pengklasifikasian arah koneksi. Pada PCQ terdapat PCQ *rate* dan *limit*. PCQ *rate* memberikan batas *bandwidth*

maksimum, sedangkan *limit* membatasi jumlah dari koneksi paralel. *Total Limit* adalah total keseluruhan koneksi paralel yang diperkenankan untuk seluruh alamat IP [13].

#### E. Quality of Service (QoS)

QoS merupakan istilah untuk pengukuran kualitas transmisi dan ketersediaan layanan suatu jaringan. Kualitas transmisi jaringan, terutama layanan VoIP, ditentukan oleh faktor *delay*, *jitter*, *packet loss*, dan *throughput*.

1) *Delay*: *Delay* merupakan jumlah waktu yang diperlukan oleh paket untuk sampai ke tujuan. Perpaduan *delay* dan *bandwidth* mampu menentukan kecepatan dan kapasitas suatu jaringan [6]. Terdapat dua faktor yang mempengaruhi *delay*: jumlah paket yang dikirimkan (*bit*) dan laju kecepatan pengiriman paket untuk setiap detik. Dari kedua faktor tersebut dapat dihitung nilai suatu *delay* sebagai hasil bagi antara jumlah paket yang dikirim dengan laju pengiriman paket. Untuk menghitung rata-rata *delay*, dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan di bawah ini. Lalu, hasil perhitungannya dapat digolongkan ke dalam rentang indeks 1-4 sehingga dapat dikategorikan kualitasnya. Kategori *delay* ditunjukkan oleh Tabel I.

$$\text{Delay rata - rata} = \frac{\text{Total delay}}{\text{Total paket yang diterima}} \quad (1)$$

TABEL I  
KATEGORI DELAY

Kategori	Delay	Indeks
Sangat Bagus	< 150 ms	4
Bagus	150 s/d 300 ms	3
Sedang	300 s/d 450 ms	2
Buruk	> 450 ms	1

(Sumber: ETSI 1999-2006)

2) *Jitter*: *Jitter* atau variasi *delay* adalah ukuran variabilitas *end-to-end delay* seluruh jaringan. Karena variasi *delay* ini, waktu ketika sebuah paket yang ditransmisikan dari sumber sampai diterima oleh penerima dapat berfluktuatif dari paket ke paket. Nilai *jitter* digunakan sebagai parameter kualitas kondisi jaringan untuk melihat kondisi jaringan dalam rentang waktu yang berbeda [6]. Contohnya, jika satu paket membutuhkan 100 ms untuk melintasi jaringan dari *endpoint* pengirim ke *endpoint* penerima dan paket tersebut memerlukan 125 ms untuk melakukan perjalanan yang sama, maka nilai *jitter* adalah 25 ms. Kategori *jitter* dapat dilihat pada Tabel II. Untuk menghitung *jitter*, dapat menggunakan rumus berikut.

$$\text{Jitter} = \frac{\text{Total variasi delay}}{\text{Total paket data yang diterima}} \quad (2)$$

TABEL II  
KATEGORI JITTER

Kategori	Peak Jitter	Indeks
Sangat Bagus	0 ms	4
Bagus	0-75 ms	3
Sedang	76-125 ms	2
Buruk	125-225 ms	1

(Sumber: ETSI 1999-2006)

3) *Packet Loss*: *Packet Loss* merupakan ukuran jumlah paket yang tidak diterima dibandingkan dengan jumlah seluruh paket yang ditransmisikan. Suatu jaringan yang baik akan menghasilkan *packet loss* dengan nilai nol. Namun jika terjadi kongesti, mekanisme QoS akan menentukan secara selektif paket mana yang akan dibuang (*drop*) untuk meringankan kongesti. Hal ini dikenal dengan istilah *congestion control*. Di bawah ini merupakan rumus untuk menghitung *packet loss*. Hasil perhitungan dari rumus tersebut dapat digolongkan ke dalam indeks dan kategori pada Tabel III untuk diketahui kualitasnya.

$$\text{Packet Loss} = \left( \frac{\text{Jumlah paket yang diterima}}{\text{Jumlah paket yang dikirim}} \right) \times 100\% \quad (3)$$

TABEL III  
KATEGORI PACKET LOSS

Kategori	Packet Loss	Indeks
Sangat Bagus	0%-2%	4
Bagus	3%-14%	3
Sedang	15%-24%	2
Buruk	>25%	1

(Sumber: ETSI 1999-2006)

4) *Throughput*: *Throughput* didefinisikan sebagai ukuran keberhasilan secara aktual di dalam pengiriman paket pada jaringan komputer oleh suatu perangkat, dilihat dari berapa banyak paket yang berhasil dikirimkan dalam kurun waktu satu detik. Nilai *throughput* diukur dengan satuan bps (*bit per second*) dan dijadikan sebagai salah satu faktor dalam pengukuran performansi *network layer*. Untuk menghitung *throughput* dapat dengan menggunakan rumus berikut.

$$\text{Throughput} = \frac{\text{Jumlah paket yang sampai di penerima}}{\text{Jumlah waktu pengiriman}} \quad (4)$$

#### F. Mean Opinion Source (MOS)

MOS merupakan jenis pengukuran yang termasuk dalam *Quality of Experience (QoE)* dari teknik komunikasi. MOS biasanya digunakan untuk mengukur kualitas video, audio, dan audio visual yang standarnya telah didefinisikan oleh ITU-T. Berdasarkan ITU-T P.800, pengukuran MOS dapat dilakukan secara subjektif untuk estimasi kualitas suara.

*Codec* memengaruhi nilai MOS. Hal ini karena tiap jenis *codec* memiliki nilai MOS masing-masing secara teoritis. Salah satu *codec* dengan kemampuan baik, G.711, memiliki nilai maksimum MOS 4,4. *Codec* ini memerlukan paling sedikit 64 kbps dengan 87,2 *Nominal Ethernet Bandwidth (NEB)* untuk bekerja dengan baik [14].

#### G. Asterisk

Asterisk merupakan *software* yang mengadaptasi *Private Branch Exchange (PBX)* sehingga memungkinkan untuk membangun jaringan telepon. *Software* yang namanya berasal dari tanda bintang (\*) ini menggunakan GNU/GPL sebagai lisensi perangkat lunak bebas dan lisensi perangkat lunak berpemilik untuk mengizinkan pemegang lisensi

mendistribusikan komponen sistem proprietary yang tidak perlu dipublikasikan. Perangkat lunak ini memungkinkan untuk memasang pesawat telepon maupun *softphone*, melakukan panggilan, menghubungkan ke layanan telepon privat dan publik, termasuk layanan telepon PSTN dan VoIP. Selain berjalan pada Sistem Operasi Linux, Asterisk juga dapat dioperasikan pada NetBSD, OpenBSD, FreeBSD, Mac OS X, dan Solaris. Tersedia juga sebuah *port* untuk Microsoft Windows yang dikenal sebagai AsteriskWin32. Asterisk cukup kecil untuk dijalankan di lingkungan sistem tertanam, yakni pada peralatan *hardware* di sisi pengguna yang menjalankan OpenWRT [15].

#### H. MikroTik

Penelitian ini menggunakan perangkat MikroTik RB951-2n dan MikroTik RB941-2nD. Kedua jenis perangkat ini merupakan RouterBoard dari MikroTik untuk keperluan rumahan maupun perkantoran. MikroTik RB951-2n memiliki arsitektur MIPS-BE, lima buah *ethernet port*, 1 buah *access point embedded* 2,4 GHz, *antenna embedded* 1,5 dBi, serta 64MB memori utama [16]. Sedangkan MikroTik RB941-2nD memiliki arsitektur SMIPS-BE, empat buah *ethernet port*, dan 16MB memori utama [17]. Standar *wireless* pada kedua *router* ini adalah 802.11b/g/n. RB951-2n mendukung penggunaan Sistem Operasi RouterOS versi 6, sehingga mampu mengimplementasikan *traffic queuing*.

### III. METODOLOGI DAN DESAIN SISTEM

#### A. Alat dan Bahan

Adapun proses perancangan jaringan pada penelitian ini memerlukan perangkat keras dan perangkat lunak sebagai penunjang. Perangkat keras yang digunakan adalah:

- Laptop sebanyak 2 buah
- MikroTik RB951-2n sebanyak 4 buah
- MikroTik RB941-2nD sebanyak 3 buah
- Linksys PAP2T sebanyak 2 buah
- Telepon analog sebanyak 2 buah
- Kabel LAN cat 5 sebanyak 14 buah
- Kabel telepon sebanyak 2 buah

Sedangkan perangkat lunak yang digunakan meliputi:

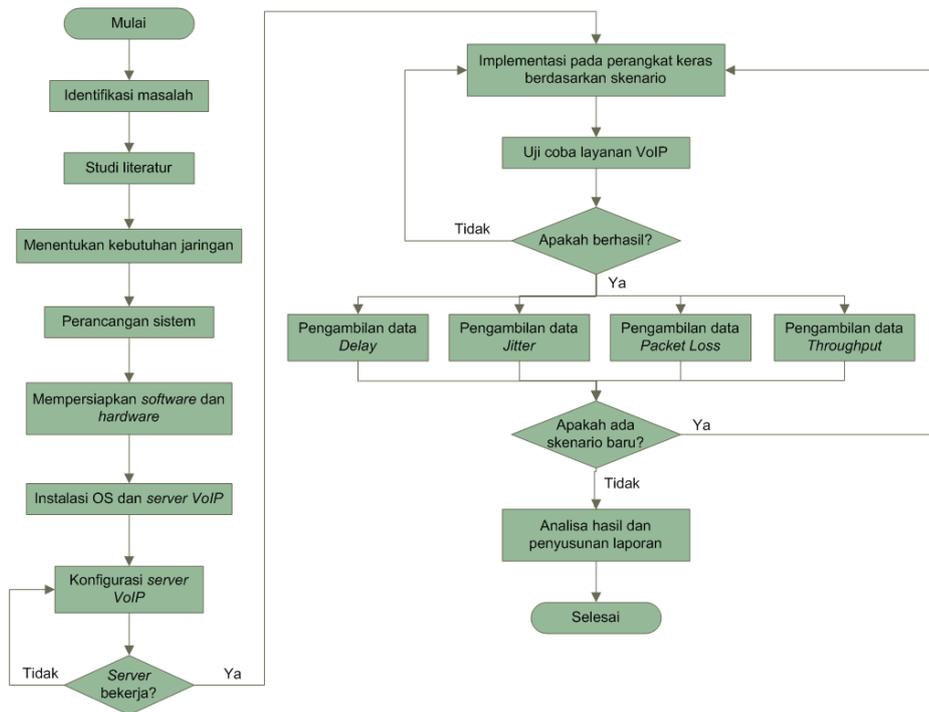
- Ubuntu 16.04
- WinBox
- Asterisk 13.1.0
- D-ITG dan Iperf3
- Wireshark

#### B. Alur Penelitian

Tahapan pertama yang dilakukan dalam penelitian ini yakni studi literatur dan perancangan sistem. Kemudian dilanjutkan dengan instalasi Ubuntu 16.04, Winbox, D-ITG dan Iperf3 di kedua laptop, serta Asterisk di laptop *server*. Perangkat keras yang dipersiapkan berupa MikroTik RB951-2n, MikroTik RB941-2nD, laptop, telepon analog, dan Linksys PAP2T sebagai adaptor telepon analog untuk layanan VoIP. Lalu dilanjutkan dengan melakukan uji coba

server dan client VoIP untuk memastikan bahwa server VoIP telah bekerja dengan baik. Setelah itu, melakukan implementasi pada perangkat keras dan menjalankan

skenario pengujian. Flowchart pada Gambar 1 berikut ini menunjukkan metode penelitian yang dilakukan oleh penulis.



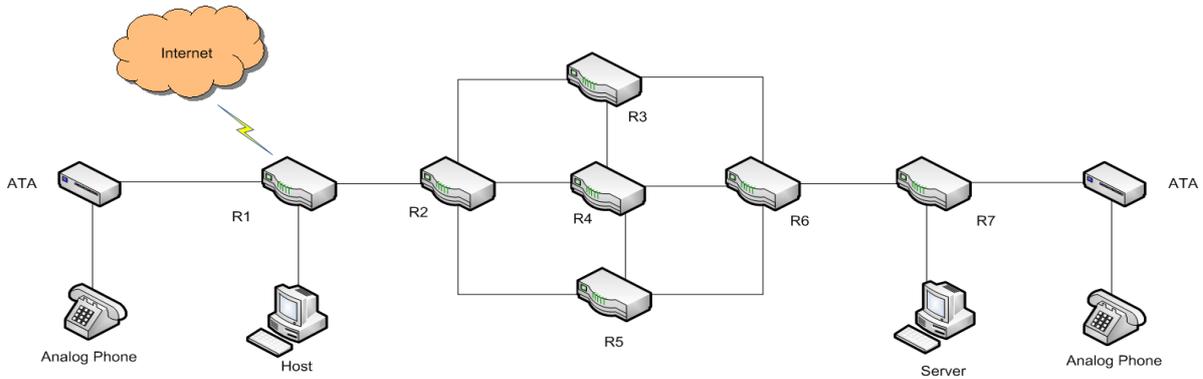
Gambar 1. Flowchart penelitian

### C. Perancangan Desain Sistem

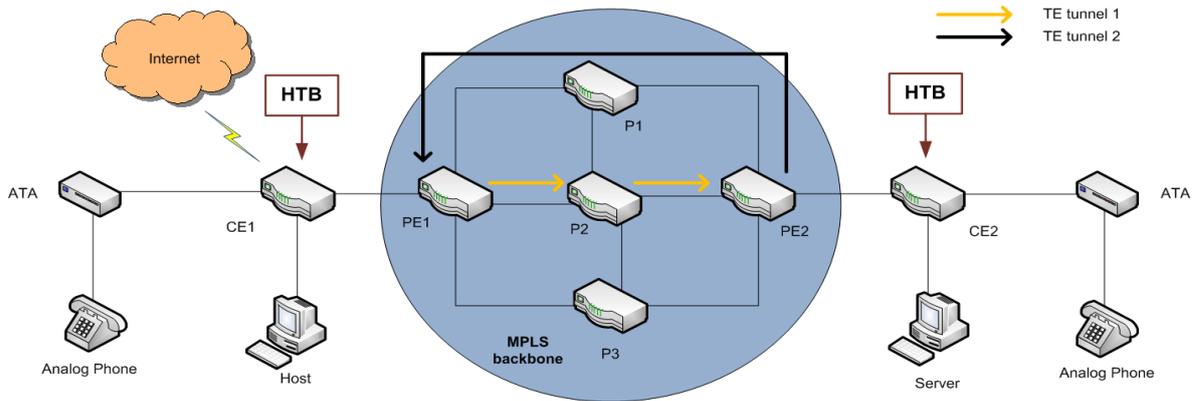
Desain sistem dalam penelitian ini dirancang dalam 3 buah skenario sebagai berikut.

1) *Skenario 1*: Layanan VoIP diterapkan pada jaringan IP tanpa konfigurasi MPLS-TE seperti pada Gambar 2. Hal ini bertujuan untuk mengetahui bagaimana QoS dan MOS layanan VoIP yang tidak menggunakan *bandwidth management* dan *Traffic Engineering*. Parameter QoS berupa *delay*, *jitter*, *packet loss*, dan *throughput*. Nilai MOS didapatkan dari penilaian kualitas VoIP berdasarkan *conversational* dan *listening test*. Terdapat dua pengujian dalam skenario ini, yakni pengambilan data QoS dan MOS VoIP dalam keadaan normal dan saat *bandwidth* penuh. *Bandwidth*

yang penuh dalam skenario ini disebabkan oleh adanya aliran trafik lain selain trafik *voice*, yaitu trafik TCP dan UDP yang mendekati alokasi *bandwidth* yang tersedia. Alokasi *bandwidth* yang tersedia adalah 2048 kbps. Trafik TCP dan UDP yang dibangkitkan masing-masing sebesar 1024 kbps. Trafik TCP dibangkitkan menggunakan D-ITG dengan perintah `./ITGSend -a <dest_address> -c <payload_metadata> -C <rate> -T <protocol> -t <duration> -l <logfile>`. Sedangkan trafik UDP deibangkitkan menggunakan Iperf3 dengan perintah `iperf -c <client> -u -i <interval> -t <time> -b <bandwidth>`. Pengambilan data dilakukan dalam 10 kali percobaan. Tiap percobaan dilakukan selama 30 detik.



Gambar 2. Topologi skenario 1

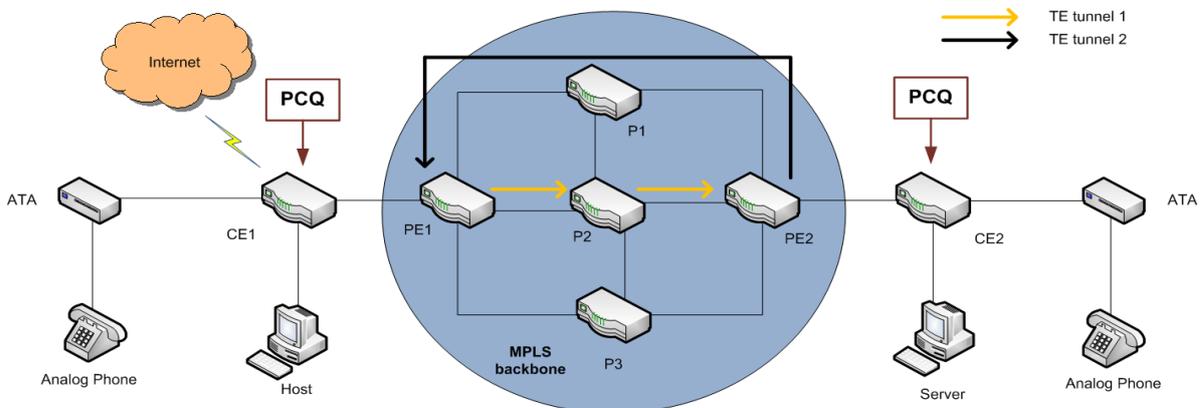


Gambar 3. Topologi skenario 2

2) *Skenario 2*: Gambar 3 adalah skenario 2. Topologi dalam skenario ini serupa dengan skenario 1. Perbedaannya, layanan VoIP diimplementasikan dalam jaringan MPLS-TE dengan menerapkan HTB. Router PE1, PE2, P1, P2, dan P3 yang terhubung secara full mesh merupakan jaringan MPLS-TE. CE1 dan CE2 adalah router yang terhubung ke jaringan client. Pada router tersebut diimplementasikan metode HTB menggunakan fitur Queue Tree pada MikroTik RouterOS.

Sama seperti skenario 1, pengambilan data QoS dan MOS dilakukan saat menjalankan trafik voice dalam keadaan normal dan ketika bandwidth penuh.

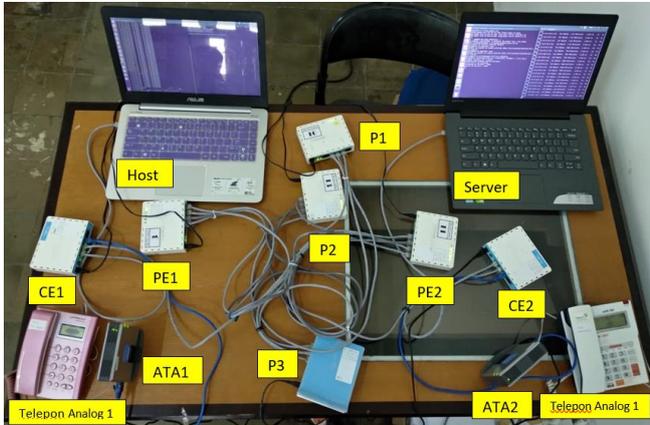
3) *Skenario 3*: Dalam skenario ketiga yang ditunjukkan oleh Gambar 4, topologi dirancang serupa seperti skenario sebelumnya. Teknik *queuing* yang diterapkan pada skenario ini adalah PCQ dan dilakukan dua macam pengujian yang sama saat pengambilan data QoS dan MOS.



Gambar 4. Topologi skenario 3

#### IV. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Tampilan implementasi perangkat penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 5 berikut. Terdapat 5 buah *router* dirangkai secara *full mesh* (P1, P2, P3, PE1, dan PE2) yang menghubungkan dua jaringan *customer*. Pada masing-masing jaringan *customer* terdapat sebuah *core router*, laptop, serta telepon analog yang difungsikan sebagai telepon VoIP menggunakan ATA (*Analog Telephone Adapter*).



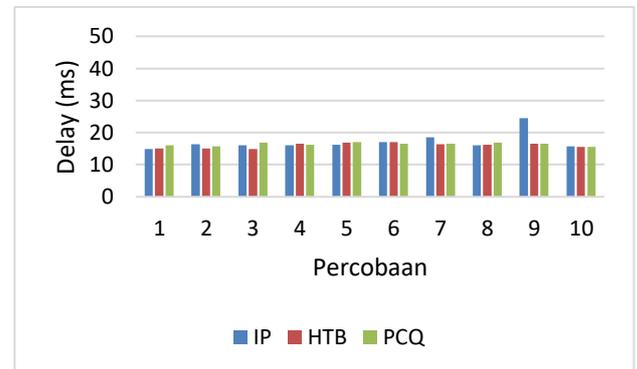
Gambar 5. Implementasi perangkat

Data yang diperoleh dari percobaan adalah nilai parameter berupa data angka yang dituangkan ke dalam bentuk grafik. Hal ini bertujuan untuk memudahkan proses analisis. Bab ini memaparkan hasil percobaan dari masing-masing skenario pengujian, dilanjutkan dengan pembahasan mengenai analisis dari tiap-tiap grafik tersebut dengan mengacu kepada studi literatur yang telah dilakukan sebelumnya.

##### A. Hasil dan Analisis Pengujian Delay

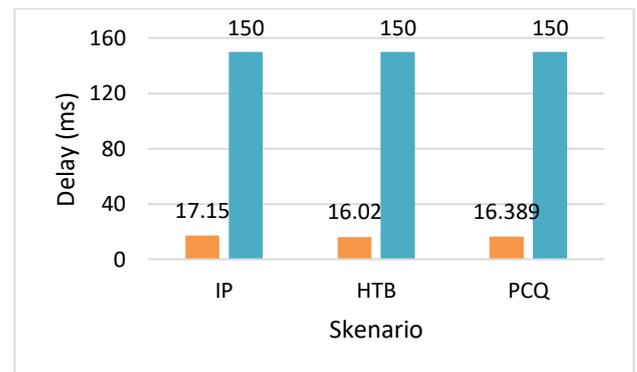
*Pengujian Delay dalam Keadaan Normal:* Delay menjadi ukuran kenyamanan pengguna layanan telepon VoIP ketika melakukan komunikasi. Delay yang dikalkulasi dalam penelitian ini diperoleh dari hasil *packet sniffing* di sisi penerima. Dalam penelitian ini, Telepon Analog 1 adalah pengirim, dan yang bertindak sebagai penerima adalah Telepon Analog 2. Nilai delay yang diperoleh dari skenario satu dibandingkan dengan skenario lainnya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6. Terlihat secara keseluruhan bahwa nilai delay trafik *voice* pada jaringan MPLS-TE dengan metode HTB paling rendah dibandingkan dengan PCQ ataupun jaringan IP, yaitu berkisar antara 14,94 ms sampai dengan 16,96 ms. Rerata yang didapatkan adalah 16,02 ms. Selanjutnya, trafik *voice* yang dilewatkan pada jaringan IP biasa memiliki kisaran delay tertinggi, yakni antara 14,94 ms sampai 24,54 ms dengan rata-rata delay 17,15 ms. Sementara itu, jaringan MPLS-TE dengan metode PCQ menghasilkan delay trafik *voice* antara 15,58 ms sampai 17,09 ms dengan rata-rata 16,389 ms. Dari hasil

penelitian, ketiga skenario memiliki *delay* dengan kualitas sangat baik karena termasuk dalam indeks 4 atau kurang dari 150 ms. Berdasarkan ketiga nilai *delay* tersebut, dapat dibuktikan bahwa trafik *voice* pada jaringan MPLS-TE menggunakan metode HTB memiliki *delay* terendah, sehingga dapat dikatakan bahwa jaringan tersebut adalah yang terbaik berdasarkan *delay*.



Gambar 6. Grafik hasil pengujian *delay* VoIP dalam keadaan normal

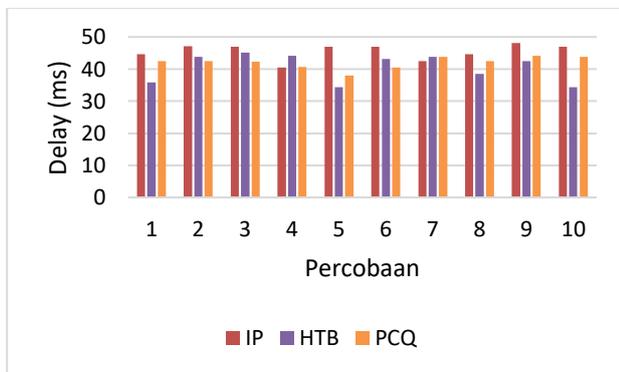
1) *Hasil Perbandingan Delay dalam Keadaan Normal:* Delay yang termasuk ke dalam kategori sangat bagus atau indeks 4 memiliki rentang nilai 0-150 ms seperti grafik berwarna biru pada Gambar 7. Gambar tersebut menampilkan perbandingan rata-rata *delay* VoIP ketiga skenario dalam keadaan normal yang ditunjukkan oleh grafik berwarna hijau. Tampak bahwa rata-rata *delay* VoIP ketiga skenario termasuk dalam kategori bagus karena tidak melebihi 150 ms.



Gambar 7. Grafik perbandingan rata-rata *delay* VoIP dalam keadaan normal

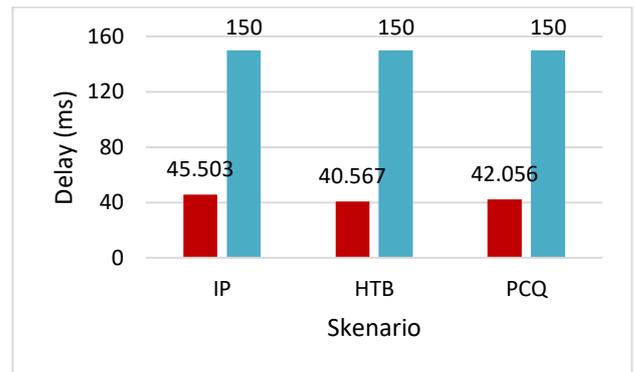
2) *Pengujian Delay saat Bandwidth Penuh:* Dalam keadaan *bandwidth* penuh, kondisi jaringan dialiri dengan trafik lain. Tujuannya yaitu untuk mengetahui performa jaringan ketika dalam keadaan sibuk. Generator yang digunakan adalah D-ITG untuk membangkitkan aliran TCP, serta Iperf3 untuk membangkitkan aliran UDP. Aliran trafik ini berasal dari laptop *host* yang satu jaringan dengan Telepon Analog 1 menuju ke laptop *server* yang berada dalam LAN yang sama dengan

Telepon Analog 2. Gambar 8 menunjukkan nilai *delay* dari ketiga skenario saat *bandwidth* penuh. Tampak bahwa nilai keseluruhan *delay* meningkat dibandingkan dengan nilai *delay* pada jaringan saat keadaan normal. Trafik *voice* pada jaringan IP berkisar antara 40,47 ms sampai 48,19 ms dengan rata-rata 45,503 ms. Pada jaringan MPLS-TE dengan metode HTB sebagai *bandwidth management*, diperoleh kisaran nilai *delay* trafik *voice* sebesar 34,4 ms hingga 45,2 ms dengan rata-rata 40,567 ms. Sedangkan nilai *delay* trafik *voice* untuk skenario ketiga atau jaringan yang menggunakan metode PCQ berada dalam kisaran 38,05 ms sampai dengan 44,12 ms, dan rata-rata yang diperoleh adalah 42,056 ms. Dari ketiga skenario, didapatkan bahwa metode HTB yang dikombinasikan dengan MPLS-TE menghasilkan *delay* terendah. Hal ini karena kemampuan *packet switching* serta adanya *tunnel path* pada MPLS-TE mampu mempercepat proses transmisi paket. Selain itu, metode HTB membagi *bandwidth* sesuai dengan kebutuhan pengguna berdasarkan prioritas. Prioritas yang diberikan untuk UDP adalah 1 sehingga paket *voice* yang menggunakan RTP dan berjalan di atas UDP mendapat *bandwidth* sesuai *limit-at* nya terlebih dahulu. *Limit-at* merupakan ukuran *bandwidth* yang didapatkan saat kondisi jaringan dalam keadaan sibuk.



Gambar 8. Grafik hasil pengujian *delay* VoIP saat *bandwidth* penuh

3) Hasil Perbandingan Delay saat Bandwidth Penuh: Pada Gambar 9, terdapat grafik berwarna merah yang menunjukkan rata-rata *delay* VoIP ketiga skenario yang dibandingkan dengan rentang nilai *delay* kategori sangat bagus atau indeks 4. Tampak bahwa rata-rata *delay* ketiga skenario masih berada dalam rentang tersebut, sehingga dapat dikategorikan sangat bagus.

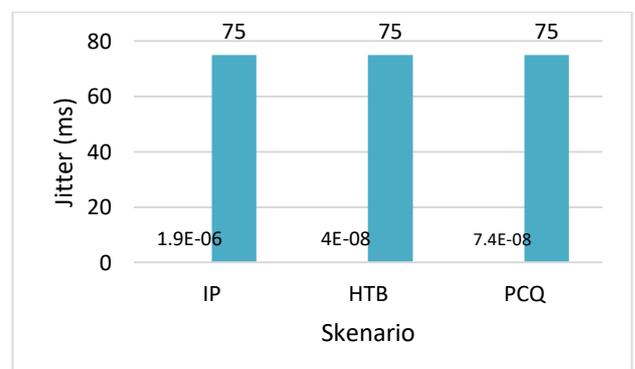


Gambar 9. Grafik perbandingan rata-rata *delay* VoIP saat *bandwidth* penuh

### B. Hasil dan Analisis Pengujian Jitter

1) Pengujian Jitter dalam Keadaan Normal: Rerata *jitter* VoIP dalam keadaan normal untuk skenario 1 atau jaringan IP adalah 0,0000019 ms, untuk jaringan MPLS-TE dengan metode HTB atau skenario 2 adalah sebesar 0,00000004 ms, serta untuk skenario 3 yaitu jaringan MPLS-TE dengan metode PCQ adalah 0,000000074 ms. *Jitter* dapat digunakan sebagai acuan akan adanya antrian dalam jaringan. Pada penelitian ini, nilai *jitter* yang didapat saat jaringan dalam keadaan normal baik skenario 1, skenario 2, maupun skenario 3 memiliki perbedaan yang sangat kecil dan ketiganya adalah indeks 3 yang merupakan kategori bagus. Hal ini menandakan bahwa paket suara berjalan dengan lancar tanpa adanya antrian yang menyebabkan kongesti. Paket dapat berjalan dengan lancar karena tidak tertumpuk oleh paket lain yang mengalir pada jaringan yang sama.

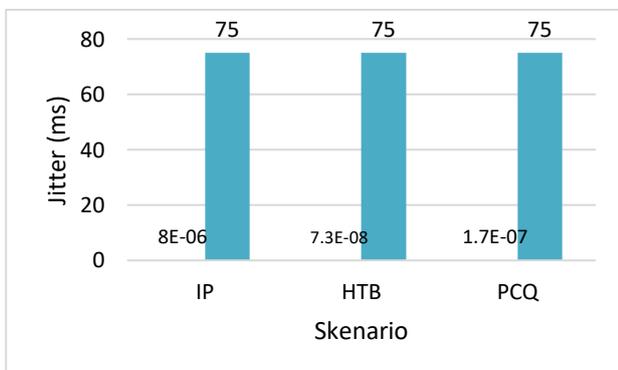
2) Hasil Perbandingan Jitter dalam Keadaan Normal: Rata-rata *jitter* yang dihasilkan oleh ketiga skenario dalam keadaan normal berada pada rentang 0-75 ms seperti yang ditunjukkan oleh perbandingan grafik pada Gambar 10. Rentang tersebut merupakan indeks 3 atau kategori bagus berdasarkan ITU-T. Hal ini menunjukkan bahwa rata-rata *jitter* dalam keadaan normal tergolong dalam kategori bagus.



Gambar 10. Grafik perbandingan rata-rata *jitter* VoIP dalam keadaan normal

3) *Pengujian Jitter saat Bandwidth Penuh:* Dibandingkan dengan nilai *jitter* pada kondisi jaringan normal, nilai keseluruhan *jitter* ketika *bandwidth* penuh sedikit lebih besar namun masih termasuk dalam indeks 3 atau kategori bagus. Nilai rerata *jitter* untuk trafik *voice* pada skenario 1 adalah 0,000008 ms, pada skenario 2 adalah 0,000000073 ms, dan pada skenario 3 adalah 0,00000017 ms. *Jitter* dipengaruhi oleh *delay* karena *jitter* merupakan variasi *delay*. Kondisi pada ketiga skenario tersebut masih tergolong bagus karena memenuhi indeks 3 pada kategori *jitter*. Perbedaan tersebut disebabkan karena jaringan MPLS-TE yang menggunakan teknik *switching* dalam melewati paket data, sehingga trafik lebih stabil daripada trafik pada jaringan IP. *Jitter* yang meningkat akan menurunkan kualitas suara karena akan terdengar terputus-putus karena hilangnya sebagian paket.

4) *Hasil Perbandingan Jitter saat Bandwidth Penuh:* Rata-rata *jitter* ketiga skenario saat *bandwidth* penuh hanya memiliki perbedaan tipis dibandingkan ketika dalam keadaan normal, dan masih berada dalam rentang 0-75 ms seperti yang ditunjukkan pada Gambar 11. Maka, rata-rata *jitter* ketiga skenario ini masih tergolong indeks 3 atau kategori bagus berdasarkan standar ITU-T.

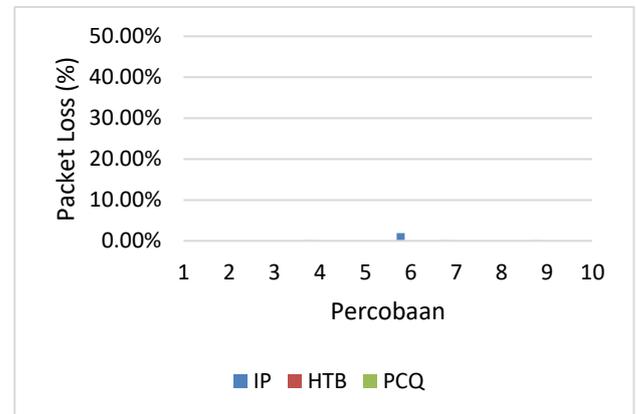


Gambar 11. Grafik perbandingan rata-rata *jitter* VoIP saat *bandwidth* penuh

### C. Hasil dan Analisis Pengujian Packet Loss

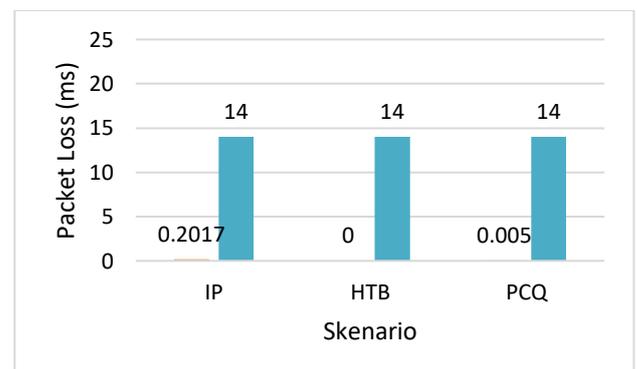
1) *Pengujian Packet Loss dalam Keadaan Normal:* *Packet loss* merupakan paket yang hilang ketika proses transmisi dari sumber ke tujuan. *Packet loss* untuk trafik *voice* pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 12. Dari grafik tersebut, diperoleh bahwa nilai rata-rata *packet loss* terendah adalah pada skenario 2, yaitu jaringan MPLS-TE dengan metode HTB yang memiliki rata-rata 0%. Sementara itu, *packet loss* untuk trafik pada jaringan MPLS-TE yang menggunakan metode PCQ memiliki nilai 0,05% untuk satu percobaan dan 0% pada 9 percobaan. Diperoleh rerata sebesar 0,005% untuk skenario ini. Selanjutnya, nilai *packet loss* pada jaringan IP berkisar antara 0% sampai 1,87% dengan nilai rata-

rata 0,2017%. Secara keseluruhan, nilai *packet loss* yang diperoleh masih dapat diterima. Hal ini dikarenakan nilai *packet loss* berada dalam kategori sangat bagus untuk ketiganya. Hal ini disebabkan karena dalam keadaan normal, tidak terdapat *noise*, tidak terjadi *collision* maupun kongesti sehingga tidak perlu ada data yang *drop*.



Gambar 12. Grafik hasil pengujian *packet loss* VoIP dalam keadaan normal

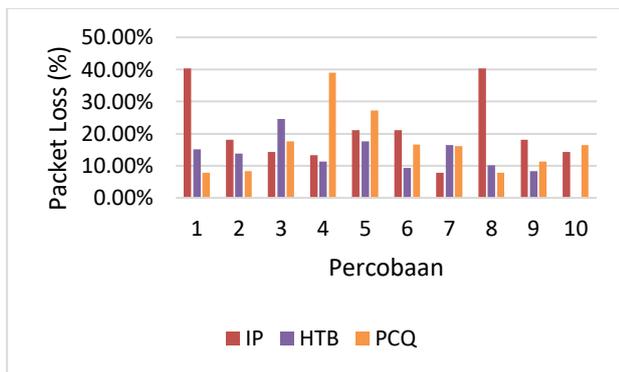
2) *Hasil Perbandingan Packet Loss dalam Keadaan Normal:* Berdasarkan standar *packet loss* dari ITU-T, *packet loss* dengan indeks 4 atau kategori sangat bagus memiliki rentang nilai 0%-2%, dan indeks 3 atau kategori bagus memiliki rentang nilai 3%-14%. Gambar 13 berikut menunjukkan perbandingan rata-rata *packet loss* ketiga skenario dengan standar *packet loss* indeks 3 dan 4 (0%-14%) yang ditunjukkan oleh grafik berwarna biru. Terlihat bahwa rata-rata *packet loss* dalam keadaan normal tidak melebihi 2% (grafik berwarna hijau), sehingga dapat dikategorikan sangat bagus.



Gambar 13. Grafik perbandingan rata-rata *packet loss* VoIP dalam keadaan normal

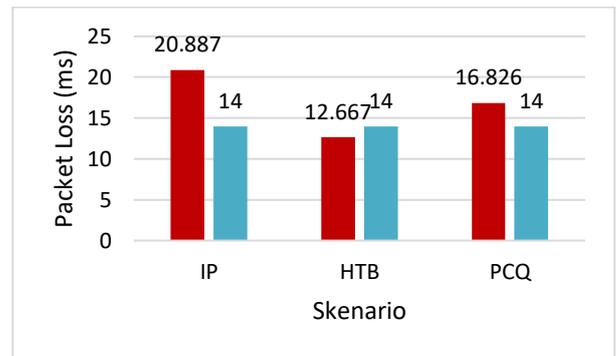
3) *Pengujian Packet Loss saat Bandwidth Penuh:* Dapat dicermati pada Gambar 14 bahwa nilai *packet loss* pada jaringan IP sangat variatif, yaitu berkisar antara 7,87% hingga 40,31% dengan rerata 20.887%. Angka tersebut merupakan indeks 2 sehingga termasuk dalam

kategori sedang. Nilai *packet loss* pada jaringan MPLS-TE dengan metode HTB juga bervariasi namun dalam rentang nilai yang lebih kecil, yakni 0% sampai 24,56%. Rerata nilai *packet loss* dalam skenario ini adalah 12,667%. Kondisi ini tergolong dalam kategori bagus atau indeks 3. Selanjutnya, trafik *voice* pada jaringan MPLS-TE yang menggunakan metode PCQ memiliki rentang nilai *packet loss* sebesar 7,87% hingga 38,93%. Rerata yang diperoleh dari nilai tersebut adalah 16,826%. Nilai ini tergolong dalam indeks 2, yaitu kategori sedang. *Bandwidth* yang penuh menyebabkan terjadinya *noise*, *collision*, ataupun kongesti sehingga terdapat paket yang di-drop agar lalu lintas trafik berjalan dengan lancar. Semakin banyak paket yang di-drop, prosentase *packet loss* semakin besar sehingga berdampak pada kualitas suara yang dihasilkan. Dari hasil pengujian ini, terbukti bahwa jaringan MPLS-TE mampu mengalirkan trafik lebih baik daripada jaringan IP, terlebih dengan metode HTB sebagai *bandwidth management*.



Gambar 14. Grafik hasil pengujian *packet loss* VoIP saat *bandwidth* penuh

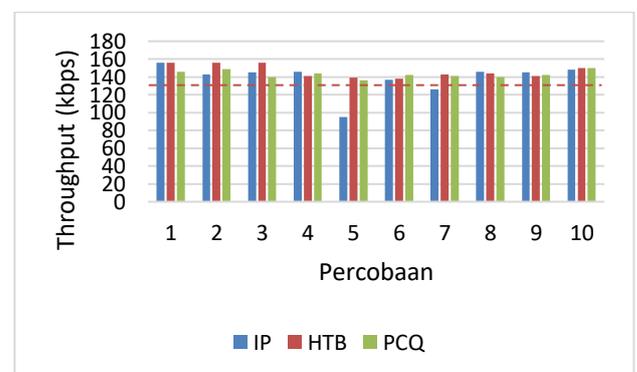
4) Hasil Perbandingan Packet Loss saat Bandwidth Penuh: Gambar 15 menunjukkan bahwa rata-rata *packet loss* jaringan IP atau skenario 1 dan jaringan MPLS-TE dengan metode PCQ atau skenario 3 melebihi 14%. Maka nilai *packet loss* tergolong dalam indeks 2 atau kategori sedang. Kategori ini memiliki rentang nilai 15%-24%. Sedangkan nilai rata-rata *packet loss* pada skenario 2 atau jaringan MPLS-TE dengan metode HTB di bawah 14% dan tergolong dalam indeks 2 atau kategori bagus.



Gambar 15. Grafik perbandingan rata-rata *packet loss* VoIP saat *bandwidth* penuh

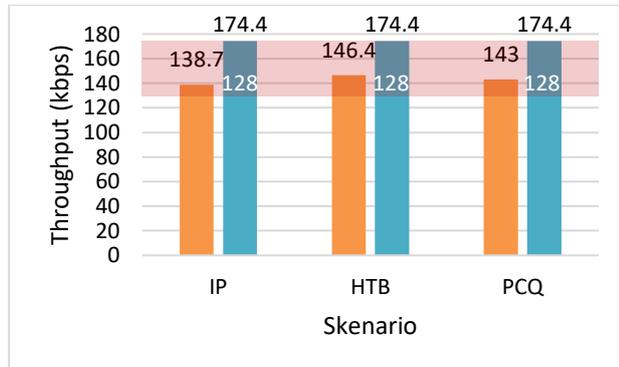
#### D. Hasil dan Analisis Pengujian Throughput

1) Pengujian Throughput dalam Keadaan Normal: Nilai *throughput* trafik *voice* pada jaringan IP berkisar antara 95 kbps hingga 156 kbps dengan rata-rata 138,7 kbps. Untuk skenario kedua yaitu ketika dilewatkan pada jaringan MPLS-TE dengan metode HTB, *throughput* trafik *voice* memiliki kisaran nilai 136 kbps sampai dengan 156 kbps dengan rerata sebesar 146,4 kbps. Sedangkan untuk trafik *voice* pada jaringan MPLS-TE dengan metode PCQ, diperoleh kisaran nilai yang lebih rendah yaitu 136 kbps hingga 150 kbps dengan rata-rata sebesar 143 kbps. *Bandwidth* yang dialokasikan pada jaringan adalah sebesar 2048 kbps, namun *throughput* yang dihasilkan dari penelitian ini adalah 138,7 kbps, 146,4 kbps, dan 143 kbps. Hal demikian dikarenakan secara teoritis *codec* G.711 membutuhkan paling sedikit 64 kbps dan ketersediaan *bandwidth* 87,2 kbps untuk bekerja. Bila terdapat dua perangkat telepon, maka menjadi dua kali lipat yaitu membutuhkan paling sedikit 128 kbps dengan *bandwidth* 174,4 kbps. Garis putus-putus berwarna merah pada Gambar 16 menunjukkan posisi 128 kbps agar grafik dapat dibandingkan dengan standar. Berdasarkan hasil penelitian, jaringan MPLS-TE dengan metode HTB menghasilkan nilai rata-rata *throughput* terbaik, yaitu 146,4 kbps. Berdasarkan nilai tersebut, *codec* G.711 pada penelitian ini mengonsumsi 73,2 kbps sehingga dapat bekerja maksimal.



Gambar 16. Grafik hasil pengujian *throughput* VoIP dalam keadaan normal

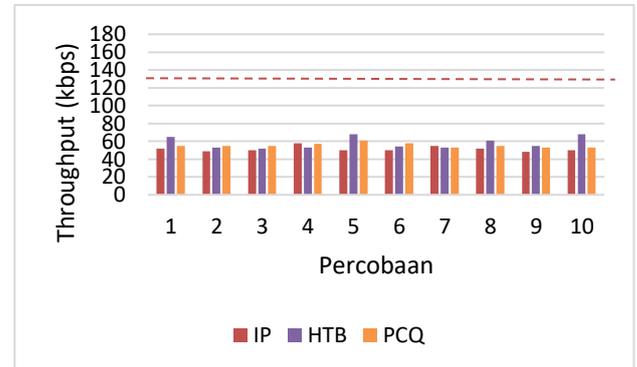
2) *Hasil Perbandingan Throughput dalam Keadaan Normal:* Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, sebuah perangkat VoIP memerlukan 64 kbps dengan ketersediaan bandwidth 87,2 kbps untuk bekerja. Grafik berwarna hijau pada Gambar 17 menunjukkan bahwa rata-rata *throughput* VoIP ketiga skenario dalam keadaan normal berada dalam rentang 128 kbps hingga 174,4 kbps (untuk dua perangkat VoIP), sehingga memenuhi kebutuhan *bandwidth* untuk dapat bekerja maksimal.



Gambar 17. Grafik perbandingan rata-rata *throughput* VoIP dalam keadaan normal

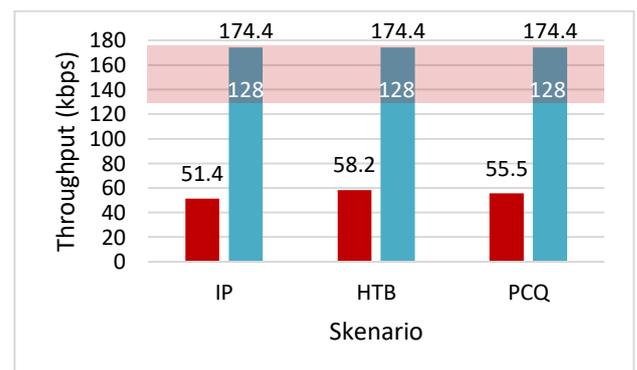
3) *Pengujian Throughput saat Bandwidth Penuh:* *Throughput* trafik *voice* pada jaringan IP memiliki rentang antara 48 kbps sampai dengan 52 kbps. Rerata yang diperoleh yaitu 51,4 kbps. Pada jaringan MPLS-TE dengan metode HTB, *throughput* trafik *voice* ketika terdapat aliran trafik lain yang memenuhi *bandwidth* berkisar antara 52 kbps sampai 68 kbps dengan rata-rata 58,2 kbps. Angka tersebut lebih besar dibandingkan dengan *throughput* trafik *voice* pada jaringan IP. Kemudian, ketika dilakukan pengujian pada jaringan MPLS-TE dengan metode PCQ, diperoleh nilai sebesar 53 kbps hingga 61 kbps dengan nilai rata-rata 55,5 kbps. Nilai *throughput* yang dihasilkan ketika *bandwidth* penuh mengalami penurunan sebesar 60,25% untuk jaringan MPLS-TE dengan metode HTB, 61,19% untuk jaringan MPLS-TE dengan metode PCQ, serta 62,94% untuk jaringan IP dari keadaan normal. Penurunan ini disebabkan oleh adanya trafik lain yang memenuhi alokasi *bandwidth* jaringan. Trafik lain yang ikut mengalir dalam jaringan menyebabkan paket *voice* harus berdampingan dengan paket-paket lain ketika ditransmisikan dalam jalur yang sama. Hal ini menyebabkan terjadinya pembagian konsumsi *bandwidth* oleh paket-paket yang mengalir dalam jaringan sehingga membuat trafik *voice* tidak dapat mengonsumsi *bandwidth* secara optimal. Dengan demikian, *throughput* yang dihasilkan oleh trafik *voice* menurun. *Throughput* yang menurun artinya kebutuhan 64 kbps (128 kbps

untuk dua perangkat) guna mengalirkan paket-paket suara baik tidak terpenuhi. Tampak pada Gambar 18 bahwa nilai *throughput* tidak mencapai garis putus-putus berwarna merah menunjukkan posisi 128 kbps. Hal ini menyebabkan adanya paket yang di-drop sehingga nilai *packet loss* meningkat, selain itu juga berdampak pada kualitas suara yang dihasilkan.



Gambar 18. Grafik hasil pengujian *throughput* VoIP saat *bandwidth* penuh

4) *Hasil Perbandingan Throughput saat Bandwidth Penuh:* Rata-rata *throughput* VoIP ketiga skenario saat *bandwidth* penuh mengalami penurunan yang signifikan sehingga tidak memenuhi standar untuk bekerja maksimal. Hal ini tampak pada Gambar 19 yang menunjukkan bahwa grafik berwarna merah merupakan rerata *throughput* VoIP tidak mencapai rentang 128 kbps - 174,4 kbps sehingga berdampak pada menurunnya kualitas VoIP.

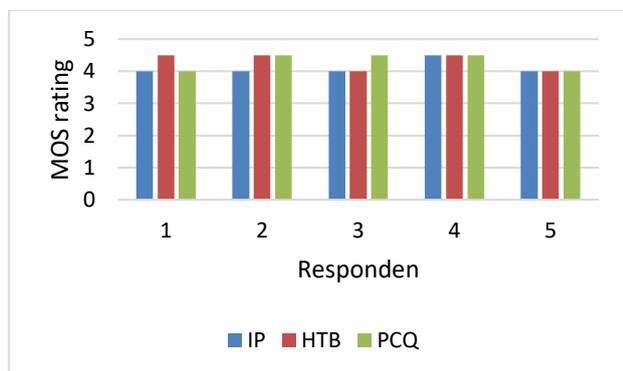


Gambar 19. Grafik perbandingan rata-rata *throughput* VoIP saat *bandwidth* penuh

### E. Hasil dan Analisis Pengujian MOS

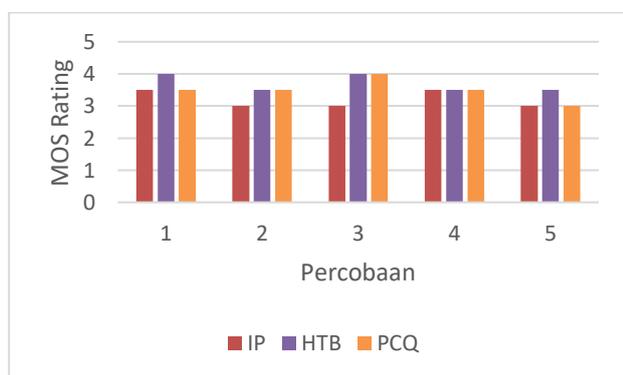
1) *Pengujian MOS dalam Keadaan Normal:* Dari Gambar 20, nilai rata-rata MOS pada jaringan IP, serta jaringan MPLS-TE baik dengan metode HTB maupun PCQ hanya memiliki rerata perbedaan yang tipis yaitu 4,1, 4,3, dan 4,3. Hasil pengujian tersebut menunjukkan bahwa kualitas suara masih dapat diterima karena tergolong dalam kategori *Good*. Hal ini dikarenakan

VoIP pada penelitian ini menggunakan *codec* G.711 yang merupakan *codec* dengan kualitas paling baik untuk VoIP, yaitu dengan nilai maksimum 4,4. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, *codec* ini mengonsumsi *bandwidth* terbesar dibandingkan dengan *codec* lainnya. Hal ini menjadi faktor mengapa kualitas yang dihasilkan *codec* G.711 adalah terbaik.



Gambar 20. Grafik hasil pengujian MOS VoIP dalam keadaan normal

2) *Pengujian MOS saat Bandwidth Penuh:* *Bandwidth* yang penuh memengaruhi kualitas MOS. Tampak pada Gambar 21 bahwa nilai MOS untuk ketiga skenario menurun dalam kondisi tersebut. Rerata nilai MOS trafik *voice* pada jaringan IP untuk *conversational opinion* dan *listening test* adalah 3,2. Pada jaringan MPLS-TE dengan metode HTB, didapatkan rata-rata nilai MOS sebesar 3,7. Sementara itu, diperoleh nilai rerata MOS sebesar 3,5 untuk trafik *voice* pada jaringan MPLS-TE yang menggunakan metode PCQ. Dapat disimpulkan bahwa nilai MOS terbaik untuk jaringan yang berada dalam keadaan normal maupun saat *bandwidth* penuh diperoleh dari jaringan MPLS-TE dengan metode HTB.



Gambar 21. Grafik hasil pengujian MOS VoIP saat *bandwidth* penuh

Dari hasil penelitian, didapatkan bahwa metode *bandwidth management* mampu memaksimalkan layanan VoIP dalam jaringan karena tidak terjadi perebutan *bandwidth*. Hal ini dibuktikan dengan nilai parameter QoS dan MOS pada jaringan MPLS-TE yang

mengimplementasikan *bandwidth management* di sisi *customer* khususnya HTB memiliki lebih tinggi daripada jaringan yang menggunakan metode PCQ maupun jaringan IP biasa. Hal ini dikarenakan kemampuan *switching* dan adanya *tunnel path* pada jaringan MPLS-TE, serta kemampuan HTB yang membagi *bandwidth* berdasarkan kebutuhan pengguna menghasilkan nilai QoS dan MOS yang paling baik dibandingkan dengan jaringan MPLS-TE yang menggunakan PCQ maupun jaringan IP.

## V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis metode HTB dan PCQ pada jaringan MPLS-TE untuk layanan VoIP, dapat ditarik kesimpulan bahwa metode HTB dan PCQ sebagai *bandwidth management* yang diterapkan pada jaringan MPLS-TE mampu mengoptimalkan VoIP karena menghasilkan nilai QoS dan MOS yang lebih baik dibandingkan dengan jaringan IP biasa yang tidak menerapkan *bandwidth management*. Secara keseluruhan, jaringan MPLS-TE yang menggunakan metode HTB menghasilkan nilai QoS VoIP terbaik dibandingkan dengan PCQ ataupun jaringan IP. *Delay* VoIP dari jaringan yang menerapkan MPLS-TE dengan metode HTB termasuk dalam kategori sangat bagus, yaitu sebesar 16,02 ms saat keadaan normal dan 40,567 ms ketika *bandwidth* penuh. Nilai rerata *jitter* dalam keadaan normal adalah 0,00000004 ms dan saat *bandwidth* penuh hanya mengalami sedikit sekali peningkatan menjadi 0,000000073 ms, sehingga tergolong dalam kategori sangat bagus. Nilai *packet loss* juga termasuk dalam kategori sangat bagus, yaitu 0% saat keadaan normal dan 12,667% saat *bandwidth* penuh. Sementara itu, nilai *throughput* dalam keadaan normal dan *bandwidth penuh* secara berurutan adalah 146,4 kbps dan 58,2 kbps.

Beberapa pertimbangan yang dapat dilakukan untuk penelitian selanjutnya yaitu melakukan performa jaringan dengan menjalankan serangan saat transmisi paket berlangsung, memperluas skala jaringan khususnya jaringan *customer*, serta menerapkan pada perangkat selain MikroTik.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] APJII. (2016) Infografis Penetrasi & Perilaku Pengguna Internet Indonesia. [Online]. Tersedia: <https://apjii.or.id/content/read/39/264/Survei-Internet-APJII-2016>. [Diakses 5 Januari 2018].
- [2] D. Sartika, "Analisis dan Simulasi Bandwidth Constraint Model pada Differentiated Service Aware MPLS Traffic Engineering." Bachelor thesis, Telkom University, Bandung, 2010.
- [3] S. S. Manoj Kumar, "Improving The Usage of Network Resources Using MPLS Traffic," *International Journal of Current Engineering and Technology*, vol. 5, no. 1, pp. 261-265, Feb. 2015.
- [4] R. M. R. M. Fitri Wulansari, "Analisis Jaringan MPLS-TE Fast Reroute Menggunakan Metode QoS Diffserv Berbasis Server

- OpenIMSCore,” *Seminar Nasional Teknologi Informasi dan Komunikasi 2016 (SENTIKA 2016)*, pp. 685-692, Mar. 2016.
- [5] A. Zainuri, “Implementasi dan Analisis Pelayanan VoIP pada Jaringan MPLS dengan Menggunakan Traffic Engineering,” Bachelor thesis, Dian Nusantara University, Semarang, Oct. 2013.
- [6] A. S. W. Y. Bagas Prawira Adji Wisesa, “Analisis Perbandingan Sistem Manajemen Bandwidth Berbasis Class-Based Queue dan Hierarchical Token Bucket untuk Jaringan Komputer,” *Jurnal Pengembangan Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer*, vol. 2, no. 6, pp. 2067-2074, Aug. 2017.
- [7] J. W. D. H. Fernandy Jupiter, “Analisis QoS Video Streaming dan VoIP dengan Metode PCQ Menggunakan Router,” Bachelor thesis, SMIK GI MDP, Palembang, Sept. 2017.
- [8] K. A. Wilmadi, “Analisis Management Bandwidth dengan Metode PCQ(Per Connection Queue) dan HTB,” Bachelor thesis, Universitas Muhammadiyah Surakarta, Surakarta, May. 2013.
- [9] A. P. A. R. dan A. G. Hutajulu, “Aplikasi Metro-E Sebagai Pengganti dari IPVPN di PT. Aplikasi Lintasarta,” *Asitron*, vol. 2, no. 4, pp. 86-95, Des. 2013.
- [10] A. I. Wijaya, “Bandwidth Management Using HTB (Hierarchical Token Bucket) Method in SMPN 5 Semarang,” Bachelor thesis, Dian Nuswantoro University, Semarang, Oct. 2013.
- [11] K. Salah, “On The Development of VoIP in Ethernet Network: Methodology and Case Study,” *Computer Communications*, vol. 29, no. 8, pp. 1039-1054, 2006.
- [12] J. L. e. a. Velenzuela, “A Hierarchical Token Bucket Algorithm to Enhance QoS in IEEE 802.11: Proposal, Implementation and Evaluation,” dalam *IEEE 60th Vehicular Technology Conference*, Los Angeles, 2004.
- [13] M. S. Pagala, “Optimasi Manajemen Bandwidth Jaringan Komputer Menggunakan Metode Queue Tree Dan PCQ (Peer Connection Queue),” Bachelor thesis, Haluoleo University, Kendari, 2017.
- [14] VOIP-Info.org. (2003) Bandwidth Consumption. [Online]. Tersedia: <https://www.voip-info.org/bandwidth-consumption/>. [Diakses 2 September 2018].
- [15] G. Shop. (2013) Asterisk. [Online]. Tersedia: <http://gudanglinux.com/glossary/asterisk/>. [Diakses 15 Januari 2018].
- [16] PT. Citraweb Solusi Teknologi. (2018) Router Wireless RB951-2n. [Online]. Tersedia: [http://www.mikrotik.co.id/produk\\_lihat.php?id=320](http://www.mikrotik.co.id/produk_lihat.php?id=320). [Diakses 2018 Maret 1].
- [17] PT. Citraweb Solusi Teknologi. (2018) Router Wireless RB941-2nD (hAP-Lite). [Online]. Tersedia: [http://www.mikrotik.co.id/produk\\_lihat.php?id=431](http://www.mikrotik.co.id/produk_lihat.php?id=431). [Diakses 1 Maret 2018].