

## **Analisis Metode *Probe Gap Model* (PGM) untuk Menentukan Ketersediaan *Bandwidth* pada Jaringan *Femtocell Backhaul***

### **Analyzing *Probe Gap Model* (PGM) Method for Determining *Bandwidth Availability* in *Femtocell Backhaul***

**Fahmi Nashir Nazzala<sup>1</sup>, Fazmah Arif Yulianto<sup>2</sup>, Anton Herutomo<sup>3</sup>**

<sup>1,2,3</sup>Prodi S1 Teknik Informatika, Fakultas Teknik, Universitas Telkom

<sup>1</sup>[nazzala@students.telkomuniversity.ac.id](mailto:nazzala@students.telkomuniversity.ac.id) <sup>2</sup>[faz@telkomuniversity.ac.id](mailto:faz@telkomuniversity.ac.id) <sup>3</sup>[antonh@telkomuniversity.ac.id](mailto:antonh@telkomuniversity.ac.id)

---

#### **Abstrak**

Teknologi 5G merupakan salah satu evolusi dari teknologi telekomunikasi yang mampu memberikan *Quality of Service* tinggi dengan nilai *latency* sangat rendah serta memberikan kecepatan akses data lebih dari 1 Gbps. Untuk memenuhi layanan tersebut teknologi 5G membutuhkan skema *mobile data offloading* tujuannya adalah meningkatkan efisiensi energi yang lebih baik, menjaga kualitas layanan dan meningkatkan ketersediaan jaringan. Penerapan *mobile data offloading* salah satunya menggunakan teknologi *femtocell*. Pengukuran ketersediaan *bandwidth* merupakan salah satu bagian yang penting dalam inisiasi proses *mobile data offloading* untuk menjamin kelancaran rekayasa lalu lintas data agar berjalan secara maksimal. Pada penelitian ini dilakukan pengukuran dan analisis ketersediaan *bandwidth* pada jaringan 5G berbasis *femtocell backhaul* menggunakan teknik pengukuran aktif dengan metode *Probe Gap Model*. Selain itu, dilakukan pengukuran menggunakan metode *Probe Rate Model* untuk memberikan perbandingan hasil dari kedua metode tersebut. Tool yang digunakan adalah *Spruce* yang berbasis *Probe Gap Model* dan *Assolo* yang berbasis *Probe Rate Model*. Trafik data yang berjalan pada *femtocell backhaul* dibangkitkan oleh *Spirent Traffic Generator* yang berfungsi juga sebagai verifikator hasil keluaran dari *Spruce* dan *Assolo*. Hasil pengujian membuktikan bahwa pengukuran ketersediaan *bandwidth* menggunakan *Spruce* lebih akurat dibanding pengukuran ketersediaan *bandwidth* menggunakan *Assolo*.

**Kata kunci :** *data offloading, femtocell backhaul, ketersediaan bandwidth*

---

#### **Abstract**

5G is one of the evolution of telecommunication technology which is able to provide high *Quality of Service (QoS)* with very low *latency* and provide data access speed more than 1 Gbps. To meet such requirement, 5G require *mobile data offloading* schema to increase energy efficiency, maintaining quality of services and improve network availability. Implementation *mobile data offloading* can use *femtocell* technology. Measurement *bandwidth* availability is one important part in the initiation process of *mobile data offloading*. The aim is to ensure smooth traffic engineering data to run optimally. In this research, measure and analyzing of the availability of *bandwidth* on *backhaul femtocell-based 5G network* using active measurement techniques with methods *Probe Gap Model*. In addition, measurements were taken using the method *Probe Rate Model* to provide a comparison of the results of that methods. *Probe Gap Model* based tool use *Spruce* and *Probe Rate Model* tool use *Assolo*. Data traffic running on the *femtocell backhaul* generated by *Spirent Traffic Generator* which also serves as a verifier of the output of *Spruce* and *Assolo*. The test results prove that the measurement *bandwidth* availability using a *Spruce* is more accurate than the measurement *bandwidth* availability using *Assolo*

**Keywords :** *data offloading, femtocell backhaul, bandwidth availability*

---

## 1. Pendahuluan

Teknologi 5G merupakan salah satu evolusi besar dalam dunia telekomunikasi modern. Teknologi 5G sebagai penerus dari teknologi 4G/LTE yang diklaim memiliki *latency* sebesar satu ms dan kecepatan *downlink* lebih dari satu Gbps [1]. Teknologi 5G tidak hanya mengandalkan kecepatan data yang tinggi namun juga menyajikan *Quality of Services (QoS)* yang tinggi, membutuhkan *delay* dan waktu pengaturan yang lebih pendek, serta mengurangi sinyal *overhead* dan konsumsi energi. Untuk memenuhi kriteria layanan tersebut, diperlukan skema *mobile data offloading* dalam penggunaan teknologi 5G. Tujuan teknik *mobile offloading data* adalah untuk mengurangi beban lalu lintas data pada jaringan *macrocell*, menjaga kualitas layanan, perluasan jangkauan suatu jaringan, peningkatan ketersediaan jaringan dan efisiensi energi yang lebih baik.

Pengukuran ketersediaan *bandwidth* merupakan salah satu inisiasi dalam penerapan *mobile offloading data* pada suatu jaringan. Tujuannya adalah untuk menjamin kelancaran lalu lintas data agar berjalan secara maksimal sehingga resiko terjadinya *bottleneck* pada jaringan semakin kecil. Ketersediaan *bandwidth* dapat didefinisikan sebagai *bandwidth* minimum yang tersisa di sepanjang jalur antara sumber dan tujuan yang dapat digunakan untuk mentransmisikan aliran baru tanpa mengganggu jalannya aliran lainnya. Teknik pengukuran ketersediaan *bandwidth* dibagi menjadi dua, yaitu pengukuran secara aktif dan pengukuran secara pasif. Sedangkan metode pengukuran secara aktif dibagi menjadi dua, yaitu *Probe Gap Model (PGM)* dan *Probe Rate Model (PRM)* [2].

Berdasarkan landasan tersebut, pada tugas akhir ini dilakukan pengukuran ketersediaan *bandwidth* pada jaringan 5G berbasis *femtocell backhaul* menggunakan metode *Probe Gap Model*. Penggunaan ini akan dibandingkan dengan pengukuran menggunakan metode *Probe Rate Model* untuk mendapatkan perbandingan performansi antar kedua metode tersebut. Performansi dapat dilihat dengan membandingkan parameter ketersediaan *bandwidth* dan nilai *Mean Absolute Percentage Error (MAPE)* [3] antar kedua metode yang digunakan. Hasil analisis yang diperoleh dapat menggambarkan performansi metode *Probe Gap Model* dengan metode *Probe Rate Model* terhadap perubahan jumlah trafik data yang terdapat pada jaringan *femtocell backhaul*.

## 2. Dasar Teori

### 2.1 Ketersediaan Bandwidth

Ketersediaan *bandwidth* dapat didefinisikan sebagai *bandwidth* minimum yang tersisa di sepanjang jalur antara sumber dan tujuan yang dapat digunakan untuk mentransmisikan aliran baru tanpa mengganggu jalannya aliran lainnya. Ketersediaan *bandwidth* dapat dihitung dengan cara pengurangan kapasitas jalur dengan beban jalur. Gambar dibawah menunjukkan model umum dari jaringan internet saat ini dan definisi secara grafis dari representasi ketersediaan *bandwidth*.

Dalam istilah teknis, ketersediaan *bandwidth* secara aktual tersedia untuk setiap *node* dari *router* yang berhubungan dengan kapasitas dari *output* antrian yang ada pada *router*, total trafik, *delay* propagasi dan waktu pelayanan paket. sebagai berikut.

$$A_i(t, T) = C_i - \lambda_i \quad (1)$$

$A_i(t, T)$  : Ketersediaan *bandwidth* pada *link i* dan saat waktu  $t$

$C_i$  : Kapasitas *link*

$\lambda_i$  : Trafik

Dimana ketersediaan *bandwidth* sepanjang *path* adalah minimal ketersediaan *bandwidth* di semua *link*.

### 2.2 Probe Gap Model

Berdasarkan model tersebut, *tools* akan mengirim pasangan paket secara berurutan sehingga memenuhi kapasitas dari *link* yang tersedia, akibatnya akan melebihi ketersediaan *bandwidth* pada *path* tersebut. Sehingga menyebabkan penyebaran paket akan menumpuk pada *link* yang dilaluinya. Penerima dapat melakukan perhitungan terhadap *bandwidth* yang tersedia melalui tingkat keluaran dan tingkat masukan dari pasangan paket. Sepasang paket *probe* dikirim dengan waktu jeda  $\Delta in$  dan waktu yang dihitung pada penerima sebagai  $\Delta out$ . Dengan menggunakan asumsi bahwa terjadi *bottleneck* tunggal dan antrian tersebut tidak menjadi kosong antara kedatangan dari pasangan paket pertama hingga kedatangan dari pasangan paket kedua, sehingga  $\Delta out$  dapat didefinisikan sebagai waktu yang digunakan oleh *bottleneck* untuk melakukan transmisi pasangan paket yang kedua dan *cross-traffic* yang tiba selama  $\Delta in$ .

Sehingga, waktu yang dipakai untuk mentransmisikan *cross-traffic* dapat didefinisikan sebagai  $\Delta_{out} - \Delta_{in}$ . Selanjutnya, laju dari *cross-traffic* didefinisikan  $(\Delta_{out} - \Delta_{in}) / \Delta_{in} * C$ , dimana C adalah kapasitas dari *link bottleneck*. Ketersediaan *bandwidth*  $\tilde{A}$  dapat didefinisikan sebagai berikut :

$$\tilde{A} = C * (1 - \epsilon) \tag{2}$$

Dimana C adalah kapasitas dari *link* yang *bottleneck* dan  $\epsilon$  adalah regangan yang didefinisikan sebagai berikut :

$$\epsilon = \frac{\Delta_{out} - \Delta_{in}}{\Delta_{in}} \tag{3}$$

Didalam, *Probe Gap Model* (PGM) diasumsikan bahwa *link* yang padat sama dengan *bottleneck* dan menganut model *First In First Out* (FIFO). PGM berasumsi bahwa kapasitas dari *link* sudah diketahui sebelumnya sehingga estimasi ketersediaan *bandwidth* dapat diukur.

### 2.3 Probe Rate Model

*Probe Rate Model* (PRM) bekerja menggunakan konsep *self-induced congestion*. Ide dari konsep tersebut adalah jika urutan paket yang dikirim berada dibawah tingkat ketersediaan *bandwidth* disepanjang *path*, maka tingkat kedatangan paket di *receiver* tidak akan menunjukkan variasi yang penting dan akan sesuai dengan rate dari pengirim. Sebaliknya, jika paket yang dikirimkan melebihi dari tingkat ketersediaan *bandwidth*, satu atau lebih antrian akan memenuhi dan lalu lintas penyelidikan akan mengalami penundaan pengiriman paket. Dengan demikian pengukuran ketersediaan *bandwidth* dilakukan melalui pengamatan titik balik pada saat aliran paket mulai mengalami kecenderungan untuk meningkat.

### 2.4 Spruce

*Spruce* adalah *tool* untuk melakukan pengukuran terhadap ketersediaan *bandwidth* yang berbasis *Probe Gap Model* (PGM). Seperti *tool* yang berbasis PGM lainnya, *Spruce* mengasumsikan terjadinya satu *bottleneck* yang memiliki *link* bersifat sempit dan rapat di sepanjang jalur. *Spruce* melakukan perhitungan ketersediaan *bandwidth* menggunakan tiga parameter yaitu C,  $\Delta_{in}$  dan  $\Delta_{out}$  dengan perhitungan sebagai berikut.

$$\tilde{A} = \frac{C * (\Delta_{in} - \Delta_{out})}{\Delta_{in} * (1 - \epsilon)} \tag{4}$$

- A = ketersediaan *bandwidth*
- C = kapasitas dari *bottleneck*
- $\Delta_{in}$  = jeda waktu antara sepasang probe untuk dikirim
- $\Delta_{out}$  = jeda waktu antar sepasang probe untuk sampai ke penerima

Untuk meningkatkan akurasi perkiraan, *Spruce* melakukan pengukuran terhadap pasangan paket dan mencatat rata-ratanya. *Spruce* menetapkan waktu *inter-gap* diantara dua pasangan paket ke suatu *output* dari fungsi distribusi eksponensial dimana rata – rata  $\tau$  jauh lebih besar daripada  $\Delta_{in}$  dan dihasilkan pada proses *Poisson sampling* (suatu mekanisme acak untuk menghasilkan data dalam hal ini adalah probe trafik yang dapat digambarkan menggunakan distribusi Poisson). *Spruce* melakukan penghitungan terhadap ketersediaan *bandwidth* pada saat waktu t sebagai rata – rata dari pengukuran sampel K yang terakhir. Nilai *default* untuk K adalah 100.

### 2.5 ASSOLO

*ASSOLO* atau Ketersediaan *Bandwidth* Smart Sampling Online *Tool* adalah *tool* yang digunakan untuk menghitung estimasi ketersediaan *bandwidth* yang merupakan perkembangan dari *Pathchirp*. Menggunakan konsep yang sama dengan *Pathchirp* yaitu *Self Loading Periodic Streams*. Konsep ini menguji berbagai tingkat menggunakan aliran paket tunggal dan menambahkan sejumlah trafik ke jaringan.

*ASSOLO* bekerja berdasarkan konsep *self-induced congestion*. Ide dari konsep ini adalah ketika urutan paket yang dikirimkan memiliki rate yang lebih rendah dari ketersediaan *bandwidth* di sepanjang *path* dan rate kedatangan paket pada sisi *receiver* tidak menunjukkan adanya variasi yang berarti maka, ketersediaan *bandwidth* akan sesuai dengan paket yang dikirim oleh *sender*. Sebaliknya, jika paket yang dikirimkan oleh *sender* melebihi ketersediaan *bandwidth* dan terjadi *delay* pada *receiver* karena antrian paket maka pengukuran *bandwidth* akan dihitung berdasarkan titik balik dimana paket *probe* menunjukkan kecenderungan peningkatan. Konsep ini memiliki dua keuntungan yaitu tidak memerlukan sinkronisasi waktu dan pengetahuan tentang topologi *end-to-end host* yang digunakan. Kelemahannya, waktu pengukuran akan sangat lambat karena harus menjaga keadaan jaringan untuk tetap dapat dilewati trafik atau aplikasi lain.

### 2.6 Mobile Data Offloading

Mobile data offloading mengacu pada pengalihan lalu lintas data mobile yang awalnya ditargetkan untuk ditransmisikan pada jaringan macrocellular (e.g. Base Transmission Station), melalui jaringan lain seperti perangkat femtocell atau wi-fi [4]. Tujuan teknik mobile offloading data adalah untuk mengurangi beban lalu lintas data pada jaringan macrocell, menjaga kualitas layanan, perluasan jangkauan suatu jaringan, peningkatan ketersediaan jaringan dan efisiensi energi yang lebih baik. Diharapkan mobile data offloading dapat menjadi salah satu segmentasi kunci dunia industri telekomunikasi dalam menghadapi peningkatan lalu lintas data seluler yang semakin cepat. Faktor utama yang mengharuskan terjadinya skema mobile data offloading adalah munculnya lalu lintas data pada jaringan seluler yang menyebabkan terjadinya congestion sehingga menurunkan QoS kepada pelanggan. Sebagian besar operator mulai memperkenalkan dan menerapkan mobile data offloading. Sejauh ini, femtocell dan wi-fi muncul sebagai teknologi offloading yang paling diminati oleh operator [4].

### 2.7 Femtocell

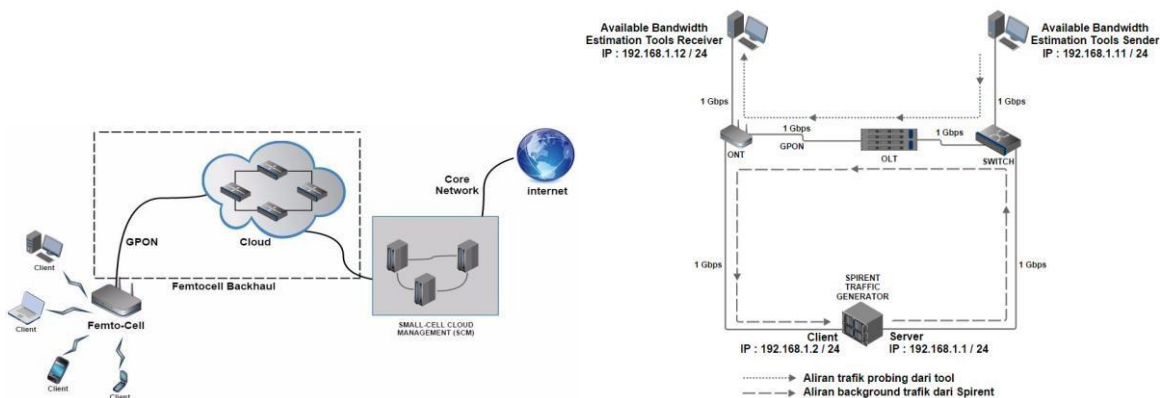
Femtocell adalah base station dengan ukuran yang kecil dan terpasang di rumah [5]. Femtocell memiliki kemiripan bentuk dengan router dimana femtocell mampu menawarkan cakupan sinyal yang baik didalam ruangan dan mengurangi beban pada Base Transmission Station (BTS). Femtocell merupakan salah satu solusi yang ditawarkan oleh operator seluler untuk memberikan kepuasan dan kepercayaan kepada pelanggan yang memiliki masalah jangkauan sinyal yang terbatas.

### 2.8 Backhaul

Pengertian secara umum backhaul adalah suatu jalur yang digunakan untuk transmisi data dari sumber ke tujuan. Dalam transmisi data, sumber akan melakukan penyerahan data kepada backhaul dan kemudian backhaul akan mentransmisikan dan menyerahkan informasi tersebut ke titik tujuan. Pada konteks ini, backhaul yang dimaksud adalah jaringan yang menghubungkan antara femtocell dengan core network pada operator. Pada teknologi jaringan generasi 5G, salah satu media transmisi yang digunakan adalah Gigabit Passive Optical Network (GPON).

## 3. Konfigurasi Jaringan

### 3.1 Topologi Rill Femtocell Backhaul



Gambar. 3. (a) Topologi riil Femtocell Backhaul, (b) Topologi pengujian ketersediaan bandwidth

Topologi pada gambar 3a merupakan topologi dasar yang digunakan oleh sistem femtocell backhaul pada umumnya. Pada topologi diatas digambarkan bahwa perangkat seluler seperti laptop, smartphone maupun komputer tablet terkoneksi pada femtocell yang dihubungkan menggunakan fiber optik pada GPON sebagai femtocell backhaul. Femtocell backhaul terhubung dengan Small-Cell Cloud Management (SCM) yang berfungsi sebagai pengendali dari jaringan femtocell, selain itu SCM terhubung langsung dengan core network pada operator seluler.

Topologi pada gambar 3b merupakan pemodelan dari topologi riil femtocell backhaul dimana peran setiap perangkat pada topologi ini mewakili peran masing – masing perangkat pada sistem femtocell backhaul. Terdiri dari Spirent Traffic Generator di sisi client yang mewakili setiap perangkat seluler yang terhubung pada femtocell.

Perangkat *Optical Network Terminal (ONT)* yang mewakili perangkat *femtocell*. Perangkat *Optical Line Termination (OLT)* yang mewakili perangkat *cloud*. Perangkat *switch* yang mewakili *Small-Cell Cloud Management (SCM)*. Perangkat *Spirent Traffic Generator* pada sisi *server* yang mewakili *core network* dari operator dimana akan mentransmisikan data dari internet ke *client*. *Link* antara *ONT* sampai dengan *switch* mewakili peran dari *femtocell backhaul* itu sendiri. Masing – masing *link* memiliki kapasitas transmisi data sebesar 1 Gbps<sup>[6]</sup>. Trafik data *probe* mengalir dari PC pengukur ketersediaan *bandwidth sender* ke PC pengukur ketersediaan *bandwidth client*. Sedangkan *background* trafik mengalir dari sisi *server* menuju sisi *client* pada *Spirent Traffic Generator*.

### 3.3 Skenario Pengujian Sistem

Tabel. 3 Parameter Simulasi [6]

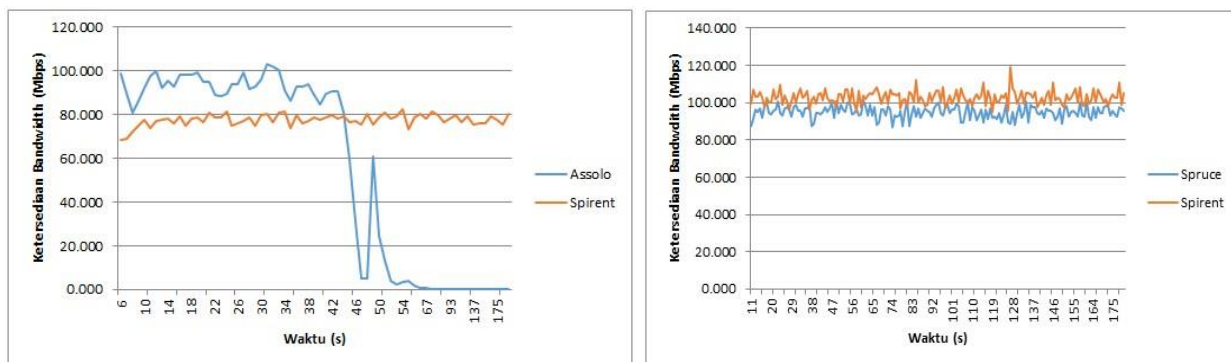
Parameters	Office	Public
Service Load:		
• HTTP 1.1	37.6 %	37.6 %
• FTP	9 %	9 %
• RTSP	46.8 %	46.8 %
• SIP	6.3 %	6.3 %
Number of users (max)	500	2500
Traffic Model	Random	Random
Technology	GPON	GPON
Backhaul bandwidth	1 Gbps	1 Gbps
Test time	1800 second	1800 second

Target segmentasi dari penggunaan *femtocell backhaul* dibagi kedalam lingkungan *office* dan publik. Karakteristik perbedaan antara lingkungan *office* dan publik ada pada jumlah pengguna yang melakukan akses terhadap layanan yang disediakan oleh *femtocell*. Pada lingkungan *office*, *femtocell* akan melayani maksimal 500 pengguna dalam suatu ruangan perkantoran. Sedangkan pada lingkungan publik, *femtocell* akan melayani maksimal 2500 pengguna dalam suatu ruang publik seperti *mall*, taman atau di lingkungan perumahan. Pengelompokan berdasarkan jumlah pengguna tersebut untuk memberikan parameter pembeda dari trafik yang dibangkitkan oleh *Spirent*.

### 4. Analisis Hasil Pengujian

Proses pengujian dilakukan selama 1800 detik dengan menyesuaikan konfigurasi maksimal 500 pengguna. Dengan empat jenis trafik yang digunakan dalam proses simulasi ini, *HTTP, FTP, RTSP* dan *SIP*. Masing – masing dari jenis trafik tersebut bisa dilihat detail ukurannya pada bab tiga bagian skenario uji. Pada awal pengujian, sistem yang dijalankan menunjukkan instabilitas sehingga dilakukan pemotongan data pada periode dimana sistem tidak stabil, sehingga data tersebut tidak dimasukkan pada proses analisis.

#### 4.1 Hasil Pengujian pada Skenario Office



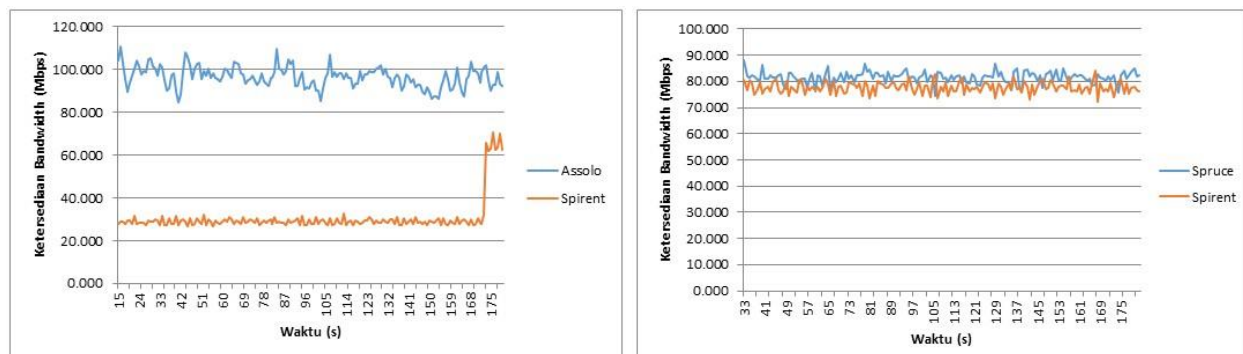
Gambar 4. (a) Perbandingan hasil pengukuran ketersediaan *bandwidth* pada *Assolo* dengan *Spirent* pada skenario *office*. (b) Perbandingan hasil pengukuran ketersediaan *bandwidth* pada *Spruce* dengan *Spirent* pada skenario *office*.

Berdasarkan gambar 4a, perbandingan ketersediaan *bandwidth* rata - rata yang dihasilkan oleh *Assolo* adalah 57,489 Mbps sedangkan ketersediaan *bandwidth* rata – rata yang dihasilkan oleh *Spirent* adalah sebesar

77,606 Mbps. Dilihat dari gambar 4a, *Assolo* tidak mampu menjaga konsistensinya dalam melakukan pengukuran *bandwidth* sehingga pada detik ke-44 ketersediaan *bandwidth* yang dihasilkan oleh *Assolo* turun hingga hampir 0 Mbps. Hal ini kemungkinan karena terjadinya mekanisme *interrupt coalescence* [7] pada *interface Gigabit Ethernet* yang berakibat pada hilangnya persebaran paket *probing* yang dikirimkan oleh *Assolo* pada saat diterima oleh *receiver* yang mengakibatkan pengukuran ketersediaan *bandwidth* oleh *Assolo* pada skenario ini tidak akurat. Hal ini mengakibatkan nilai rata – rata selisih hasil pengukuran ketersediaan *bandwidth* *Assolo* dengan *Spirent* mencapai 20,117 Mbps sehingga perhitungan ketersediaan *bandwidth* oleh *Assolo* tingkat akurasi rendah. Karena semakin rendah nilai rata – rata selisih antara *Assolo* dengan *Spirent* akan menghasilkan akurasi yang semakin tinggi.

Berdasarkan gambar 4b, pengukuran ketersediaan *bandwidth* pada skenario office menggunakan *Spruce* memiliki akurasi yang cukup tinggi. Hal ini dapat dibuktikan dengan nilai rata - rata selisih pengukuran ketersediaan *bandwidth* dari *Spirent* dengan *Spruce* sebesar 7,906 Mbps. Ketersediaan *bandwidth* rata – rata yang dihasilkan oleh *Spruce* adalah 94,833 Mbps dan hasil dari *Spirent* adalah 102,739 Mbps. Berdasarkan Gambar 4b respon *Spruce* terhadap perubahan ketersediaan *bandwidth* yang simultan cukup akurat karena *Spruce* berasumsi bahwa hanya terdapat satu *bottleneck* di sepanjang *link* yang diukur.

#### 4.2 Hasil Pengujian pada Skenario Publik

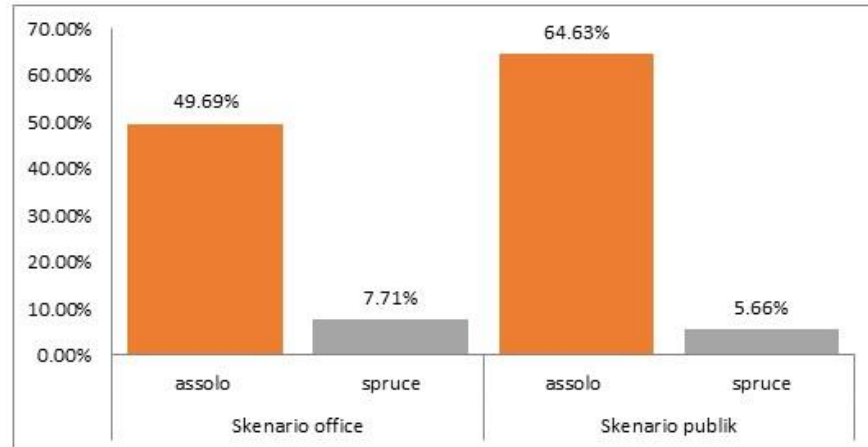


Gambar 5. (a) Perbandingan hasil pengukuran ketersediaan *bandwidth* pada *Assolo* dengan *Spirent* pada skenario publik. (b) Perbandingan hasil pengukuran ketersediaan *bandwidth* pada *Spruce* dengan *Spirent* pada skenario publik

Berdasarkan gambar 5a, ketersediaan *bandwidth* rata – rata yang dihasilkan oleh *Assolo* adalah sebesar 85,524 Mbps. Sedangkan ketersediaan *bandwidth* yang dihasilkan oleh *Spirent* adalah sebesar 40,305 Mbps. Berdasarkan gambar 5a, terjadi perbedaan trend ketersediaan *bandwidth* yang cukup tinggi dari hasil pengukuran oleh *Assolo* maupun *Spirent*. Faktor yang mempengaruhi perbedaan tersebut adalah respon *Assolo* yang lambat terhadap perubahan ketersediaan *bandwidth* akibat profil *REACH* yang digunakan oleh *Assolo* itu sendiri. Berdasarkan nilai rata - rata selisih hasil pengukuran ketersediaan *bandwidth* *Assolo* dan *Spirent* sebesar 45,219 Mbps yang berarti akurasi pengukuran ketersediaan *bandwidth* oleh *Assolo* terbukti rendah pada skenario publik.

Penggunaan jumlah pengguna yang besar ternyata berpengaruh terhadap akurasi pengukuran ketersediaan *bandwidth* yang diukur oleh *Spruce*. Terbukti dari gambar 5b, ketersediaan *bandwidth* dari *Spruce* dibandingkan dengan *Spirent* mengalami trend yang cukup baik, dimana rata – rata ketersediaan *bandwidth* dari *Spruce* adalah 81,599 Mbps dan rata - rata ketersediaan *bandwidth* dari *Spirent* adalah 77,682 Mbps. Selain itu dilihat dari gambar 4a respon dari *Spruce* terhadap perubahan ketersediaan *bandwidth* pada skenario publik cukup akurat hal ini karena *Spruce* menggunakan asumsi hanya terjadi satu *bottleneck* sepanjang *link* yang diukur hal ini berakibat pada respon dari *Spruce* untuk menangani perubahan trafik yang signifikan terhadap ketersediaan *bandwidth* pada suatu *link* yang diukur. Akurasi pengukuran ketersediaan *bandwidth* yang dilakukan *Spruce* tergolong tinggi. Hal ini dapat dilihat dari nilai rata - rata selisih pengukuran ketersediaan *bandwidth* dari *Spirent* dan *Spruce* yang hanya 3,917 Mbps.

### 4.3 Analisa Terhadap Parameter Mean Absolute Percentage Error



Gambar 6. Perbandingan nilai MAPE masing – masing *tool* pada setiap skenario

Pada gambar 4.5 dapat dilihat pada skenario *office* bahwa nilai *Mean Absolute Percentage Error (MAPE)* yang dihasilkan oleh Assolo adalah 49,69% sedangkan nilai MAPE yang dihasilkan oleh Spruce adalah 7,71%. Hal ini mengakibatkan Spruce memiliki akurasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan Assolo pada skenario *office* karena semakin rendah nilai MAPE yang dihasilkan mengakibatkan semakin tingginya akurasi pengukuran ketersediaan *bandwidth* pada skenario tersebut.

Pada skenario publik berdasarkan gambar 4.5 dapat dilihat bahwa nilai MAPE yang dihasilkan oleh Assolo adalah 64,63% sedangkan nilai MAPE yang dihasilkan oleh Spruce adalah 5,66%. Sehingga, dapat disimpulkan bahwa Spruce memiliki akurasi pengukuran ketersediaan *bandwidth* yang lebih tinggi dibandingkan dengan Assolo pada skenario publik.

## 5. Kesimpulan dan Saran

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan analisa terhadap metode *Probe Gap Model (PGM)* untuk mengukur ketersediaan *bandwidth* pada jaringan *Femtocell Backhaul* dapat diambil kesimpulan sebagai berikut.

1. Penggunaan *tool Spruce* dalam pengukuran ketersediaan *bandwidth* pada *femtocell backhaul* terbukti mampu memberikan akurasi ketersediaan *bandwidth* yang tinggi berdasarkan nilai *mean absolute percentage error* sebesar 7,71% pada skenario *office* dan 5,66% pada skenario publik
2. *Tool Spruce* memberikan akurasi yang lebih baik jika dibandingkan dengan *tool Assolo* pada pengukuran ketersediaan *bandwidth* menggunakan skenario *office* maupun *publik*.
3. Berdasarkan analisa terhadap nilai *Mean Absolute Percentage Error*, Spruce memiliki akurasi yang lebih tinggi apabila digunakan untuk melakukan pengukuran ketersediaan *bandwidth* dengan jumlah pengguna yang tinggi. Sedangkan Assolo memiliki akurasi yang lebih tinggi apabila digunakan untuk melakukan pengukuran ketersediaan *bandwidth* dengan jumlah pengguna yang rendah.

### 5.2 Saran

Untuk pengembangan tugas akhir ini dapat dilakukan pengujian pada jaringan yang lebih kompleks misalnya pada jaringan *Metro Ethernet* dengan jumlah node yang lebih banyak dan karakteristik data trafik yang lebih bervariasi. Selain itu diharapkan dapat dilakukan pengujian dengan menggunakan *tools* berbasis *Probe Gap Model* yang lebih bervariasi untuk membandingkan performansi antar *tools* tersebut.

## 6. Daftar Pustaka

- [1] GSMA Intelligence, "Understanding 5G : Perspectives on Future Technological Advancements in Mobile," *GSMA Intelligence Understanding 5G*, pp. 3-15, December 2014.
- [2] Giuseppe Rossi, Emanuelle Goldoni, and Alberto Torelli, "Assolo, A New Method for Available Bandwidth Estimation," in *Fourth International Conference on Internet Monitoring and Protection*, 2009.
- [3] Spyros Makridakis, Steven C. Wheelwright, and Rob J. Hyndman, *Forecasting : Methods and Applications*, 3rd ed. New York, USA: John Wiley & Sons, Inc, 1998.
- [4] Adnan Aijaz, Hamid Aghvami, and Mojdeh Amani, "A Survey on Mobile Data Offloading : Technical and Business Perspective," *IEEE Wireless Communications*, pp. 104-102, 2013.
- [5] Haddad Y and Porrat D, "Femtocell : Opportunities and challenges of the home cellular base station for 3G," in *Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference*, Washington DC, USA, 2007.
- [6] Francesco Lo Presti et al., "TROPIC D51 : Distributed computing, storage and radio resource allocation over cooperative femtocells," *System level aspects of TROPIC femto-clouding*, vol. a, p. 43, December 2014.
- [7] Constantinos Dovrolis, Manish Jain, and Ravi Prasad, "Effects of Interrupt Coalescence on Network Measurements," in *Passive and Active Network Measurements*, Chadi Barakat and Ian Pratt, Eds.: Springer Berlin Heidelberg, 2004, pp. 247-256.