

PENGARUH INTERFERENSI *HIDDEN NODE* TERHADAP MODEL PREDIKSI KETERSEDIAAN *BANDWIDTH* DI JARINGAN NIRKABEL

Adhi Rizal

Program Studi Teknik Informatika, Fakultas Ilmu Komputer, Universitas Singaperbangsa Karawang
Jl. H.S. Ronggowaluyo, Teluk Jambe, Karawang, Indonesia
e-mail: adhi.rizal@staff.unsika.ac.id

ABSTRAK

Ketersediaan bandwidth merupakan salah satu aspek penting untuk menjamin QoS dalam transmisi data, terutama pada jaringan nirkabel. Walaupun demikian, prediksi ketersediaan pada jaringan nirkabel masih sulit dilakukan karena medium transmisi dapat digunakan oleh beberapa node secara bersamaan. Selain itu jaringan nirkabel juga rentan terhadap pengaruh dari sinyal transmisi yang dihasilkan dari node lain, terutama hidden node. Beberapa penelitian telah dilakukan untuk mengembangkan model prediksi ketersediaan bandwidth. Walaupun demikian, belum terdapat mekanisme terstandarisasi yang digunakan untuk mengevaluasi ketersediaan bandwidth pada jaringan nirkabel. Selain itu tingkat akurasi dari setiap model juga masih belum diketahui ketika diimplementasikan pada jaringan nirkabel, terutama dengan keberadaan hidden node. Oleh karena itu penelitian ini berupaya untuk menginvestigasi kinerja dari setiap model untuk memprediksi ketersediaan bandwidth pada jaringan nirkabel dengan interferensi hidden node. Model prediksi yang dibandingkan adalah Distributed Lagrange Interpolation Based Available Bandwidth Estimation (DLI-ABE), Cognitive Passive Estimation of the Available Bandwidth (cPEAB), Improved Available Bandwidth (IAB), dan Available Bandwidth Estimation (ABE). Percobaan dilakukan dalam skala simulasi yang dikembangkan menggunakan simulasi jaringan OMNet++. Hasil penelitian menunjukkan bahwa model ABE memperoleh tingkat akurasi yang paling baik sebesar 85,25%.

Kata Kunci: jaringan nirkabel, ketersediaan bandwidth, OMNet++, prediksi, QoS.

ABSTRACT

QoS requirement guarantee can be determined by some factors. But, one of the most critical factor is the availability of bandwidth, particularly in wireless networks because in real environment the transmission medium can be used by several devices or nodes simultaneously. It causes the availability of bandwidth prediction tend to more difficult. In addition, wireless networks are also vulnerable to transmission signals generated from other nodes. Many researches have been conducted to build the availability of bandwidth prediction model. However, there is no standardized mechanism used to evaluate them on wireless networks. Moreover, the level of accuracy of each model is still unknown when implemented on wireless networks, particularly with hidden nodes interference as neighboring nodes. Hence, this research aims to evaluate the performance of each model to predict the availability of bandwidth on wireless network with hidden node interference. These models are Distributed Lagrange Interpolation Based Available Bandwidth Estimation (DLI-ABE), Cognitive Passive Estimation of the Available Bandwidth (cPEAB), Improved Available Bandwidth (IAB), and Available Bandwidth Estimation (ABE). The experiments were carried out on a simulation scale that was developed using OMNet++ network simulator. The result showed that ABE model obtained the best accuracy rate of 85.25%.

Keywords: available bandwidth, OMNet++, prediction, QoS, wireless networks.

I. PENDAHULUAN

MODEL matematika atau skema untuk memprediksi ketersediaan *bandwidth* merupakan aspek penting dalam komunikasi data di jaringan internet. Lebih dari itu, konsep ini sangat diperlukan di berbagai bidang, misalnya untuk memenuhi atau menjaga *Service Level Agreement* (SLA), manajemen jaringan, rekayasa transmisi data, menyediakan sumber daya untuk aplikasi *real-time*, mengendalikan kongesti, dan mendeteksi gangguan atau serangan terhadap jaringan internet [1] [2]. Prediksi ketersediaan *bandwidth* juga merupakan komponen penting sebagai mekanisme *admission control* untuk menyediakan jaminan *Quality of Service* (QoS) pada jaringan kabel maupun nirkabel [3]. Walaupun demikian, pada era industri 4.0, sebagian besar benda-benda yang saling terkoneksi dengan internet pada umumnya menggunakan jaringan nirkabel.

Terkait dengan penggunaan jaringan nirkabel, pada umumnya teknologi ini sangat rentan terhadap penggunaan sumber daya, misalnya ketersediaan *bandwidth*. Prediksi *bandwidth* pada jaringan nirkabel, terutama pada teknologi WLAN (*Wireless Local Area Network*) merupakan faktor penting untuk pengelolaan sumber daya jaringan dan menyediakan layanan yang dapat menjamin QoS untuk aplikasi multimedia secara *real-time* [4] [5]. Oleh karena itu, konsep ini juga dapat digunakan sebagai salah satu parameter untuk menyesuaikan kualitas dari audio/video yang sedang ditransmisikan [6] [7]. Sebagai contoh, ketika ketersediaan *bandwidth* mencukupi, maka kualitas audio dan video dapat ditingkatkan. Namun jika ketersediaan *bandwidth* terbatas, maka hanya beberapa

komponen multimedia tertentu yang ditingkatkan sedangkan komponen lain berada pada kualitas rendah [8] [9].

Saat ini beberapa model matematika untuk memprediksi ketersediaan *bandwidth* telah dikembangkan berdasarkan indikator-indikator tertentu [10]. Hal ini disebabkan karena informasi yang didapatkan dari evaluasi ini sangat bermanfaat untuk aplikasi yang bergantung pada ketersediaan *bandwidth* (misalnya aplikasi *multimedia streaming*) sebelum ditransmisikan untuk mencapai jaminan QoS [11]. Walaupun demikian, tidak ada mekanisme terstandarisasi untuk mengevaluasi ketersediaan *bandwidth* pada jaringan yang menghubungkan antarperangkat (*node*) [12]. Selain itu tingkat akurasi dari setiap model masih belum diketahui ketika diimplementasikan pada jaringan nirkabel dengan konfigurasi yang sama, terutama pada jaringan yang dipengaruhi oleh interferensi dari *hidden node*. Oleh karena itu, suatu analisis dibutuhkan untuk menentukan model yang paling akurat untuk memprediksi ketersediaan *bandwidth* di jaringan nirkabel.

Pada penelitian ini terdapat empat model matematika yang dibandingkan untuk memprediksi ketersediaan *bandwidth*, yaitu DLI-ABE [13], cPEAB [14], IAB [15], dan ABE [16]. Untuk menginvestigasi kinerja dari setiap model, maka ketersediaan *bandwidth* optimal pada suatu jaringan juga akan diidentifikasi, kemudian dibandingkan dengan prediksi yang dihasilkan dari keempat model tersebut. Selanjutnya kinerja dari model prediksi akan dievaluasi menggunakan dua parameter, yaitu akurasi dan tingkat kesalahan. Selain itu, semua skenario pengujian akan dilakukan dalam skala laboratorium menggunakan simulasi menggunakan simulator jaringan OMNet++ dengan *framework* Inet.

II. PENELITIAN TERKAIT

Beberapa penelitian terkait komparasi model prediksi ketersediaan *bandwidth* telah dilakukan sebelumnya. Penelitian yang dilakukan oleh [17] bertujuan untuk mengkaji beberapa *tools* untuk memprediksi *bandwidth* di jaringan kabel dan nirkabel. *Tools* tersebut diantaranya adalah pathchar, pchar, IGI, iPerf, Wbest, DietTOPP, MBE, dan sebagainya. Selain itu, penelitian ini juga mengusulkan arsitektur yang dapat beradaptasi dengan ketersediaan *bandwidth* untuk *video streaming*.

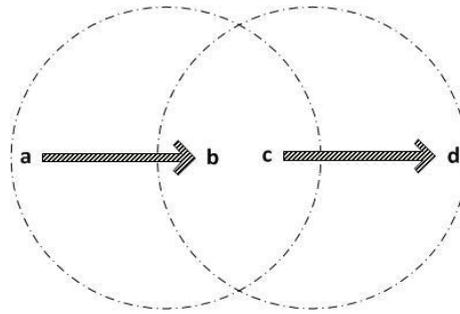
Selanjutnya [18] bertujuan untuk menganalisis teknik-teknik prediksi ketersediaan *bandwidth* yang pernah dilakukan oleh penelitian lain pada jaringan kabel maupun nirkabel. Penelitian ini juga membedakan teknik tersebut menjadi 4 kategori, yaitu teknik *probing*, teknik pasif, teknik yang hanya digunakan untuk jaringan nirkabel, dan teknik prediksi lainnya. Beberapa parameter yang digunakan untuk membandingkan teknik prediksi *bandwidth* diantaranya adalah akurasi, waktu prediksi, dan *overhead* yang ditimbulkan terhadap jaringan.

Salcedo dkk. [19] melakukan perbandingan *Available Bandwidth Estimation Tools* (ABET's) secara komprehensif dengan beberapa konfigurasi skenario. Skenario tersebut diantaranya adalah menggunakan beberapa *tools* yang menghasilkan beban trafik berbeda, *testbed* eksperimen, dan juga implementasi pada jaringan berkinerja tinggi (10 Gpbs) atau yang lebih tinggi menggunakan *tools open-source*. Selain itu, beberapa *tools* yang dibandingkan pada penelitian ini adalah Next-FT, Best-AP, ASSOLO, dan Wbest.

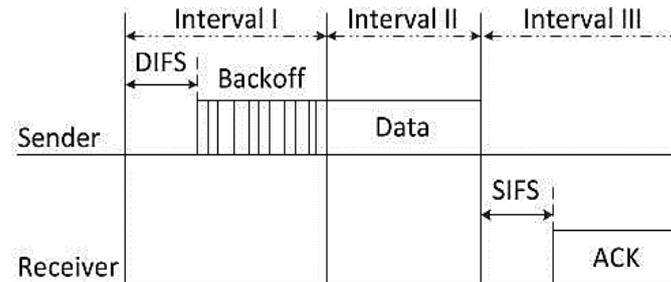
Berbeda dengan penelitian lain yang telah dilakukan, penelitian ini bertujuan untuk membandingkan model matematika untuk memprediksi ketersediaan *bandwidth* pada jaringan nirkabel. Selain itu, model yang digunakan adalah memiliki karakteristik pasif, yaitu dapat memprediksi ketersediaan *bandwidth* tanpa harus membebani jaringan internet yang digunakan [20]. Dengan kata lain, model yang digunakan berfungsi untuk memantau kondisi jaringan antarperangkat tanpa mengirimkan *probing packets* [21] [22]. Dengan demikian pertukaran data antarperangkat tidak akan terganggu dengan eksperimen yang akan dilakukan. Selain itu untuk menginvestigasi kinerja dari setiap model secara lebih mendalam, maka penelitian ini juga mengembangkan skenario transmisi data dengan kehadiran *hidden node*. *Hidden node* merupakan kondisi ketika suatu *node* (perangkat) tidak dapat mengidentifikasi (merasakan) transmisi data yang dilakukan oleh perangkat lain [23]. Ilustrasi *hidden node* dapat dilihat pada Gambar 1 yang menunjukkan bahwa *node a* dan *node c* berada pada jangkauan atau lingkup sinyal nirkabel berbeda, sehingga masing-masing *node* tidak dapat mendeteksi ketika salah satu *node* mentransmisikan data. Jika *node a* mentransmisikan data menuju *node b*, maka *node c* akan mendeteksi kondisi kanal atau medium transmisi berada pada kondisi *idle*. Masalah terjadi ketika pada saat yang bersamaan dengan *node a*, *node c* juga mentransmisikan data menuju *node d*. Hal ini dapat menyebabkan kemungkinan adanya tabrakan antar paket data di *node b*, yang berakibat pada kesalahan atau kerusakan data yang diterima. Berdasarkan hal ini, maka *node c* adalah *hidden node* bagi *node a*.

III. METODE PENELITIAN

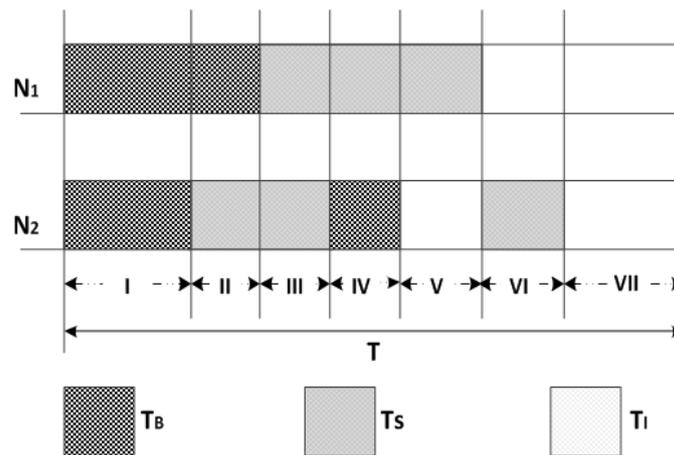
Tahapan ini terdiri dari pemaparan model prediksi ketersediaan *bandwidth* yang dibandingkan, pemilihan waktu pengukuran untuk memprediksi ketersediaan *bandwidth*, pengembangan model simulasi, dan pengembangan metode validasi. Penelitian ini mengadaptasi penelitian [13] untuk menentukan waktu percobaan, yaitu sebanyak



Gambar 1. Ilustrasi *hidden node*.



Gambar 2. Urutan pertukaran *data frame* pada IEEE 802.11.



Gambar 3. Contoh fase penempatan kanal transmisi [25].

10 kali pengulangan untuk setiap beban trafik yang dihasilkan dari *hidden node* dengan interval pengukuran setiap 1 detik.

Pada penelitian ini, eksperimen dilaksanakan dalam lingkup simulasi yang dikembangkan menggunakan simulator jaringan OMNet++. *Tool* ini digunakan untuk mengembangkan skenario dan melakukan konfigurasi infrastruktur jaringan internet dengan interferensi dari *hidden node*. Setiap model akan diterapkan untuk memprediksi ketersediaan *bandwidth* pada kanal jaringan infrastruktur tersebut.

A. Model Prediksi Ketersediaan *Bandwidth*

Bagian ini berisi analisis komprehensif mengenai empat model prediksi ketersediaan *bandwidth* yang akan dibandingkan. Sebelum pemaparan rincian mengenai karakteristik setiap model, Gambar 2 menunjukkan urutan pertukaran *data frame* pada IEEE 802.11 [14] yang dapat digunakan sebagai referensi untuk membantu mendeskripsikan karakteristik model tersebut.

1) *cPEAB*

Model matematika ini memprediksi ketersediaan *bandwidth* dengan melibatkan atau memperhitungkan beberapa faktor, yaitu waktu *backoff* dan DIFS (*Distributed Interframe Space*), kemungkinan tabrakan antar paket data, pengukuran periode kondisi *idle* pada medium/kanal, dan waktu yang mekansime *acknowledgement*. Berdasarkan hal ini, maka *cPEAB* dapat memprediksi ketersediaan *bandwidth* di jaringan nirkabel menggunakan persamaan (1).

$$AB_{cPEAB} = (1 - K) \times (1 - ACK) \times (1 - P_c) \times \frac{T_i}{T} \times C. \quad (1)$$

Pada persamaan (1), koefisien K diperoleh dengan mengadopsi hasil penelitian [14] yang menyatakan bahwa nilai tersebut merepresentasikan jumlah *bandwidth* yang dikonsumsi oleh waktu DIFS dan mekanisme *backoff* yang dapat dilihat pada Gambar 2 (Interval I). Interval I merupakan salah satu jenis *overhead* yang dapat mempengaruhi *throughput* dan memiliki dampak mengurangi akurasi dalam memprediksi ketersediaan *bandwidth*. Pada kondisi jaringan aktual ketika terdapat minimal dua *node* yang melakukan pertukaran data, waktu *backoff* akan dihasilkan setiap transmisi *data frame* secara acak. Oleh karena itu seperti pada [25], untuk menghitung K , maka yang digunakan adalah nilai rata-rata *backoff*. Secara keseluruhan, nilai K dapat diperoleh menggunakan persamaan (2).

$$K = \frac{DIFS + \overline{backoff}}{T}. \quad (2)$$

Pada persamaan (2), $\overline{backoff}$ merupakan waktu tunggu lapisan MAC pada sebuah *node* sebelum melakukan transmisi *data frame* atau melakukan mekanisme retransmisi setelah terjadi tabrakan antar paket data. Sedangkan T merupakan durasi pengukuran ketersediaan *bandwidth* setiap kali percobaan. ACK merupakan proporsi waktu (*delay*) yang dibutuhkan untuk melakukan mekanisme *acknowledgement*. ACK dapat dihitung menggunakan persamaan (3). Selain itu, T_i adalah waktu *idle* kanal transmisi yang dirasakan oleh *node* pengirim. Waktu *idle* kanal merupakan kondisi di mana medium/kanal sedang tidak digunakan untuk melakukan transmisi.

$$ACK = \frac{ACKTimeout + SIFS}{T}. \quad (3)$$

P_c merepresentasikan kemungkinan tabrakan antar paket yang disebabkan oleh *hidden* atau *exposed nodes*. Interval II pada Gambar 3 digunakan untuk melakukan transmisi *data frame* yang bergantung pada ukuran *frame*. Pada interval ini, terdapat kemungkinan tabrakan antar paket dapat terjadi antara paket data yang ditransmisikan secara simultan dari beberapa *hidden/exposed nodes*. Berdasarkan kondisi ini maka P_c dapat diperoleh menggunakan persamaan (4) yang menunjukkan bahwa f_h dan f_e masing-masing adalah total *throughput* dari *hidden* dan *exposed nodes*. Nilai C pada persamaan (1) adalah kapasitas kanal maksimum.

$$P_c = \begin{cases} \frac{f_h}{C - f_e}, & \text{jika } \left(0 \leq \frac{f_h}{C - f_e} \leq 1\right) \\ 1 & \text{selain itu} \end{cases}. \quad (4)$$

2) ABE

ABE dapat memprediksi ketersediaan *bandwidth* dengan melibatkan probabilitas waktu *idle* kanal antara *node* pengirim dan penerima dalam proses perhitungan. Model ini mengasumsikan bahwa medium transmisi digunakan secara terpisah antara *node* pengirim dan penerima. Dengan kata lain, ketika *node* pengirim berada pada kondisi *idle*, maka pada saat yang sama *node* ini akan mengirimkan paket data secara langsung menuju *node* penerima. Berdasarkan kondisi ini, maka ketersediaan *bandwidth* dapat diprediksi berdasarkan persamaan (5). Pada persamaan ini, T_i^s adalah waktu *idle* kanal yang dirasakan oleh *node* pengirim, sedangkan T_i^r merupakan waktu *idle* kanal yang dirasakan oleh *node* penerima. Sedangkan nilai K , P_c , dan C diperoleh dengan cara yang sama dengan model cPEAB.

$$AB_{ABE} = (1 - K) \times (1 - P_c) \times \frac{T_i^s}{T} \times \frac{T_i^r}{T} \times C. \quad (5)$$

3) DLI-ABE

Model DLI-ABE merupakan pengembangan dari model ABE. Walaupun demikian, model ini hanya memilih waktu minimum kondisi *idle* pada *node* pengirim atau *node* penerima saja. Selain itu, koefisien K diperoleh dengan melibatkan durasi *SIFS* (*Short Inter-frame Space*) dan *DIFS*, waktu yang dibutuhkan untuk mekanisme *Request to Send / Clear to Send* (*RTS/CTS*), serta mekanisme *acknowledgement*. DLI-ABE juga menggunakan kemungkinan tabrakan antar paket ($P(m)$) sebagai hasil perkalian dari panjang paket dan jumlah paket yang berhasil diterima yang dapat diperoleh berdasarkan persamaan (6).

$$P(m) = (f(m) \times p_{Hello}). \quad (6)$$

Secara keseluruhan DLI-ABE dapat memprediksi ketersediaan *bandwidth* pada *link* antara pengirim dan penerima menggunakan persamaan (7).

$$AB_{DLI-ABE} \approx (1 - K) \times (1 - P_m) \times \left(\min \left(\left[\frac{T_i^s \left(1 - p \left(\frac{T_s^r}{T} \right) \right)}{T} \right] C, \left[\frac{T_i^r \left(1 - p \left(\frac{T_s^s}{T} \right) \right)}{T} \right] C \right) \right). \quad (7)$$

Beberapa komponen pada model DLI-ABE diilustrasikan pada Gambar 3. Variabel N dinyatakan sebagai *node*, T_B merupakan durasi kondisi *busy*, T_S merupakan durasi kondisi *sense busy*, sedangkan T_I adalah durasi kondisi *idle*. Semua kondisi pada Gambar 3 mengalami kondisi *overlap* (tumpang tindih) kecuali pada periode V dan VI. Pada periode ini, ketersediaan *bandwidth* akan berkurang karena salah satu *node* akan berada pada kondisi *sense busy* (merasakan kanal/medium sedang digunakan) sedangkan *node* lainnya berada pada kondisi *idle* sehingga mengurangi ketersediaan *bandwidth*. DLI-ABE menggunakan dua periode ini untuk menemukan sinkronisasi periode *idle* di antara *node* pengirim dan penerima. Pada persamaan (7), T_s^r adalah durasi kondisi *sense busy* yang dirasakan oleh *node* penerima, sedangkan T_s^s merupakan durasi kondisi *sense busy* yang dirasakan oleh *node* pengirim. Selain itu, koefisien p adalah rasio tabrakan antar paket ketika suatu medium transmisi mencapai kinerja terbaik (maksimal *throughput* dengan *delay* dan *jitter* yang rendah). Setelah kondisi ini berlalu, maka *throughput* akan menurun secara signifikan dengan *delay* dan *jitter* yang semakin meningkat maksimal. Sesuai dengan [15], dengan mengasumsikan bahwa *node* terdistribusi secara seragam di jaringan yang padat, maka nilai dari p adalah 0,66.

4) IAB

Serupa dengan DLI-ABE, IAB juga memperhitungkan sinkronisasi kondisi kanal dan membedakan kondisi *busy* dan *sense busy* pada suatu *node*. Ketersediaan *bandwidth* berdasarkan model IAB dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan (8).

$$AB_{IAB} \approx (1 - K) \times \left(\min \left(\left[\frac{T_i^s (1 - p_2 (T_s^r / T))}{T} - \mu \right] C, \left[\frac{T_i^r (1 - p_1 (T_s^s / T))}{T} - \mu \right] C \right) \right). \quad (8)$$

Pada persamaan (8), $\mu = 1 - C_u \times (1 - p)$ adalah koefisien untuk mencegah suatu *node* menggunakan *bandwidth* berlebih, sedangkan C_u adalah besar penggunaan *bandwidth* pada suatu kanal. Berdasarkan [15], yang menyatakan bahwa setiap *node* tersebar secara merata pada jaringan yang padat, maka koefisien p_1 dan p_2 sama-sama memiliki nilai 0,66 dan μ ditetapkan sebesar 0,1. Komponen lain yang digunakan dalam IAB sama dengan model prediksi yang telah dipaparkan sebelumnya.

B. Konfigurasi Eksperimen

Sub-bab ini berisi penjelasan mengenai konfigurasi yang dibutuhkan untuk menganalisis kinerja dari setiap model prediksi ketersediaan *bandwidth*. Konfigurasi ini mencakup pemilihan durasi pengukuran untuk menerapkan setiap model dalam memprediksi, mengembangkan model simulasi jaringan, dan mengembangkan metode validasi. Sesuai pada [13], percobaan dilakukan 10 kali untuk setiap beban trafik yang dihasilkan oleh *hidden node* dan setiap pengulangan dilakukan dengan durasi 1 detik. Penelitian dilakukan dalam skala simulasi yang dikembangkan menggunakan OMNet++. Kemudian setiap model diimplementasikan ke dalam setiap skenario untuk melakukan proses validasi dan verifikasi. Proses validasi dilakukan untuk memastikan bahwa setiap skema dapat digunakan untuk memprediksi ketersediaan *bandwidth* di antara dua *node* pada jaringan nirkabel dengan *node* lain sebagai *hidden node* yang mempengaruhinya. Sedangkan proses verifikasi dilakukan untuk memastikan bahwa pengembangan eksperimen dan simulasi memenuhi standar atau sesuai dengan kondisi nyata.

1) Menentukan Periode Pengukuran

Variabel durasi pengukuran (T) akan berpengaruh langsung terhadap ketersediaan *bandwidth* karena prediksi dilakukan terhadap ketersediaan *bandwidth* itu sendiri. Hal ini disebabkan karena jaringan nirkabel sangat rentan terhadap beban trafik dari *node* yang berdekatan [26]. Penelitian yang dilakukan oleh [13] menyatakan bahwa durasi untuk pengambilan sampel ketersediaan *bandwidth* harus dilakukan sekecil mungkin sehingga setiap model dapat bereaksi atau merespon secara cepat terhadap perubahan yang terjadi pada jaringan nirkabel. Selain itu DLI-

Gambar 4. Skenario percobaan dengan *hidden node*.

ABE dan cPEAB menggunakan durasi pengukuran selama satu detik untuk memprediksi ketersediaan *bandwidth*. Oleh karena itu, untuk membandingkan setiap model secara seragam, maka penelitian ini juga menggunakan durasi yang sama, yaitu $T = 1$ detik.

2) Mengembangkan Model Simulasi

Simulasi jaringan yang digunakan untuk mengevaluasi setiap model dapat dilihat pada Gambar 4. Model simulasi jaringan terdiri dari tiga *Mobile Nodes* (Laptop) dan dua *Access Point* (AcP). Jenis medium transmisi yang digunakan pada skenario ini adalah IEEE 802.11g dengan kapasitas fisik *link* sebesar 54 Mbps dan daya atau kekuatan transmisi yang digunakan sebesar 0,009 mW. Selain itu berdasarkan hasil percobaan, parameter ambang batas *signal attenuation* diatur sebesar -57,5 dBm untuk merepresentasikan jangkauan *carrier sense* pada setiap MN dan AP.

Pada Gambar 4, Laptop-1, AcP-1, dan Laptop-2 terhubung satu sama lain. Berdasarkan konfigurasi yang telah ditetapkan, jika simulasi diimplementasikan di kondisi yang sebenarnya, maka Laptop-1 dengan AcP-1, Laptop-2 dengan AcP-1, dan Laptop-3 dengan AcP-2 memiliki jarak yang sama, yaitu ± 11 meter. Sedangkan Laptop-2 dengan Laptop-3 memiliki jarak ± 30 meter. Walaupun model DLI-ABE khusus diterapkan pada jaringan nirkabel mode *ad-hoc*, namun pada penelitian ini model tersebut diadaptasi untuk diterapkan pada jaringan nirkabel mode *infrastructure*.

Untuk menginvestigasi kinerja masing-masing, model maka penelitian ini mengembangkan beberapa skenario pengujian ketersediaan *bandwidth* diukur sebagai *throughput* yang masih dapat dihasilkan oleh AcP-1 yang mengirimkan data menuju Laptop-2 (*receiver node*) dan masih berada di dalam jangkauan transmisinya namun dapat merasakan transmisi yang berasal dari Laptop-3. Walaupun demikian, AcP-1 terletak di luar cakupan transmisi dari Laptop-3. Kemudian dengan mengadaptasi skenario pengujian yang terdapat pada [25], maka Laptop-1 mengirimkan paket data UDP (*User Datagram Protocol*) dengan *bitrate* 500 Kbps dengan ukuran paket 1024 *bytes*. Sedangkan beban trafik yang dikirimkan oleh Laptop-3 menuju AcP-2 bervariasi mulai dari 1 Mbps sampai 7 Mbps dengan interval *bitrate* 1 Mbps dengan ukuran paket 1024 *bytes*.

Berdasarkan Gambar 4, Laptop-3 merupakan *hidden node* bagi AcP-1 yang sedang mengirimkan paket data menuju AcP-2. Skenario ini dapat memicu terjadinya tabrakan antar paket data pada Laptop-2. Hal ini disebabkan karena Laptop-2 dapat terkena dampak sinyal yang dihasilkan oleh Laptop-3, namun AcP-1 tidak terkena pengaruhnya. Selain itu kondisi ini juga menyebabkan ketersediaan *bandwidth* berkurang pada *link* yang menghubungkan antara AcP-1 dengan Laptop-2 yang terletak pada jangkauan *carrier sense* dari Laptop-3, tetapi di luar jangkauan transmisinya.

AcP-1 dan Laptop-3 merupakan *node* yang berdekatan (*neighboring nodes*) dengan Laptop-2 dengan level *single hop* (1-*hop*) sehingga dapat menerima informasi aliran data satu sama lain. Berdasarkan konsep ini, maka sesuai [23], AcP-1 dapat diatur untuk memantau, merekam, dan memperbarui informasi aliran data dari *neighboring nodes* secara berkelanjutan. AcP-1 dapat menerima informasi aliran data yang ditransmisikan oleh Laptop-2. Selain itu Laptop-2 merupakan 1-*hop* dengan Laptop-3, sehingga AcP-1 juga dapat mengetahui informasi aliran data dari Laptop-3. Berdasarkan kondisi AcP-1 yang juga menerima aliran data dari Laptop-1, maka total *throughput* dari *hidden node* dapat diperoleh dengan mengurangi *throughput* dari AcP-1 ke Laptop-2 dengan *throughput* dari Laptop-3 menuju AcP-2.

3) Metode Validasi

Untuk mengukur ketersediaan *bandwidth* aktual, dua *node* ditambahkan untuk bertukar data melalui AcP-1 sehingga memenuhi medium/kanal transmisi. *Bitrate* yang ditransmisikan dari *node* pengirim tambahan, kemudian disesuaikan dengan *bitrate* transmisi data dari Laptop-1 menuju Laptop-2. Pada penelitian ini, ketersediaan *bandwidth* aktual adalah *throughput* maksimum dari aliran paket data yang dapat memenuhi medium transmisi dan diperoleh dari *node* pengirim dan penerima tambahan tersebut tanpa mempengaruhi (mengurangi) aliran data dari Laptop-1 menuju Laptop-2.

Kinerja dari 4 model divalidasi dengan menggunakan dua parameter pengukuran, yaitu akurasi dan besar kesalahan prediksi. Akurasi merupakan hasil pengukuran yang diperoleh dari perbandingan (rasio) hasil ketersediaan *bandwidth* masing-masing model dengan ketersediaan *bandwidth* aktual. Kemudian parameter kesalahan prediksi mengindikasikan tingkat kesalahan hasil dari setiap model yang dibandingkan dengan ketersediaan *bandwidth* aktual. Nilai kesalahan prediksi yang semakin kecil menunjukkan nilai akurasi yang tinggi. Sesuai dengan [13], tingkat kesalahan prediksi dapat diperoleh menggunakan (9). *HasilPrediksiModel* merupakan hasil ketersediaan *bandwidth* yang diperoleh dari setiap model. Selain itu untuk mencegah kesalahan dalam perhitungan penelitian ini menggunakan nilai absolut pada nilai pembilang.

$$\text{Kesalahan Prediksi (\%)} = \frac{|BandwidthAktual - HasilPrediksiModel|}{BandwidthAktual} \times 100\%. \quad (9)$$

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

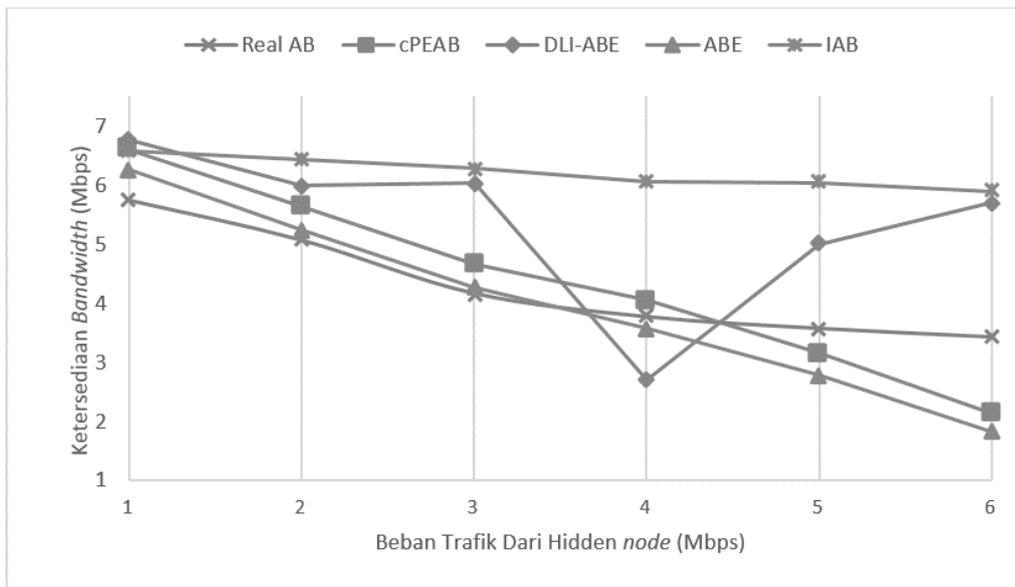
A. Ketersediaan *Bandwidth* Aktual

Berdasarkan hasil percobaan sesuai Gambar 4, kapasitas maksimum *throughput* (C) pada *link* yang menghubungkan Laptop-1 dengan Laptop-2 melalui AcP-1 adalah sebesar 7,756 Mbps. Nilai ini diperoleh dari maksimum *throughput* yang dapat ditransmisikan oleh Laptop-1 menuju Laptop-2 tanpa adanya interferensi dari sinyal atau *nodes* lain. Penelitian ini mengadaptasi [9] sehingga diasumsikan bahwa beban trafik yang diujicobakan harus kurang dari kapasitas maksimum dari *link* yang digunakan. Oleh karena itu skenario pengujian dilakukan dengan melakukan konfigurasi terhadap parameter *send interval* pada OMNet++ sehingga *hidden node* dapat mengirimkan beban trafik dari 1 Mbps sampai 6 Mbps.

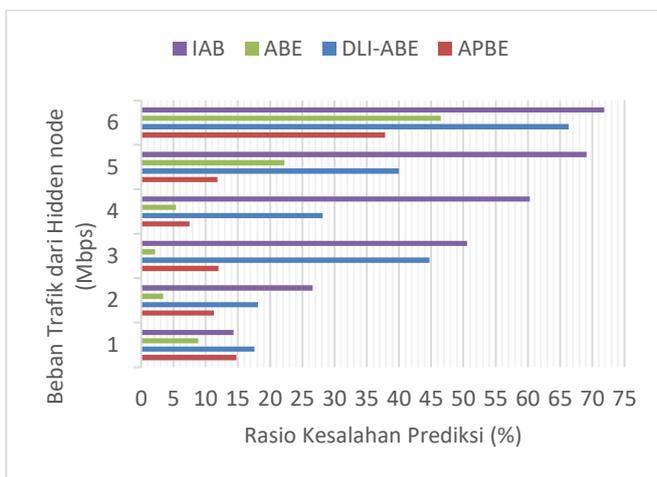
B. Perbandingan Hasil Prediksi Setiap Model

Jika dilihat pada Gambar 5 dan Tabel 1, ketika *hidden node* melakukan transmisi beban trafik dari 1 sampai 4 Mbps atau ketika mengonsumsi 52% dari kapasitas *bandwidth* maksimum, maka ketersediaan *bandwidth* akan berkurang secara signifikan. Namun, ketika *hidden node* menghasilkan beban trafik lebih dari 4 Mbps atau mengonsumsi lebih dari 52% kapasitas *bandwidth* maksimum, ketersediaan *bandwidth* tidak berkurang signifikan. Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa ketika terdapat beban trafik sebesar 1 Mbps sampai 4 Mbps, maka ketersediaan *bandwidth* aktual masing-masing bernilai 5,754, 5,077, 4,172, sampai 3,775. Berdasarkan hasil tersebut, rata-rata kapasitas *bandwidth* yang dikonsumsi oleh trafik *hidden node* adalah sebesar 0,65 Mbps. Sedangkan ketika beban trafik yang dihasilkan oleh *hidden node* lebih dari atau sama dengan 4 Mbps, ketersediaan *bandwidth* yang dihasilkan adalah sebesar 3,775, 3,576, 3,431, dengan rata-rata konsumsi *bandwidth* sebesar 0,18 Mbps. Berdasarkan hasil yang diperoleh, dapat disimpulkan bahwa beban trafik yang dihasilkan oleh *hidden node* tidak selalu memiliki dampak (mengurangi) terhadap ketersediaan *bandwidth* secara signifikan pada *link* yang menghubungkan antar *nodes*. Hal ini disebabkan karena walaupun beban trafik yang ditransmisikan suatu *neighbor node* meningkat, namun kekuatan transmisi pada antena atau gelombang radio dari *node* tersebut berada pada kondisi konstan. Kondisi ini sebanding dengan nilai ambang batas pelemahan sinyal (*signal attenuation*) yang juga bernilai konstan. Hal ini menyebabkan walaupun *neighbor node* mentransmisikan paket-paket data dengan *bitrate* yang semakin besar/meningkat tetapi tidak dapat berpengaruh besar terhadap transmisi paket data yang sedang dilakukan oleh *node* utama.

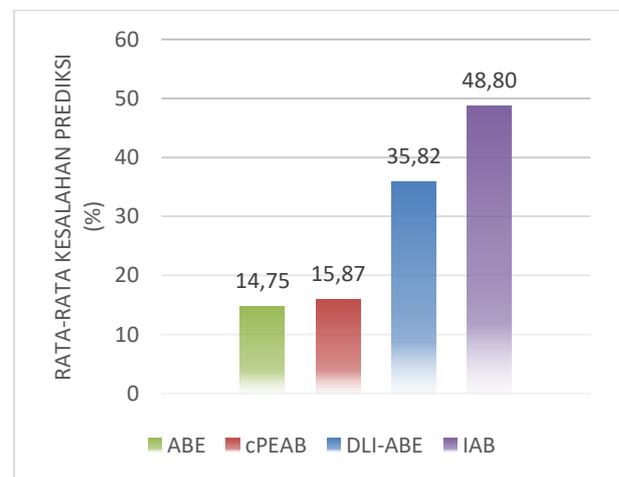
Pada Tabel 1 dan Gambar 5, hasil ketersediaan *bandwidth* berdasarkan IAB cenderung menurun (namun tidak signifikan) ketika beban trafik dari *hidden node* meningkat. Hal ini disebabkan karena IAB tidak melibatkan pertukaran pesan *ACK* dan kemungkinan tabrakan antar paket secara *real time* yang dapat menyebabkan *overhead* sehingga mengurangi ketersediaan *bandwidth*. Ketika mekanisme (paket data) *acknowledgement* ditransmisikan oleh *hidden node*, maka kondisi kanal atau medium transmisi pada *node* utama (*node* yang diukur ketersediaan *bandwidth*-nya) akan berada pada kondisi *sense busy* karena terpengaruh dari sinyal transmisi *hidden node*. Hal ini menyebabkan *node* utama akan menunggu kondisi medium transmisi berada pada dalam kondisi *free* atau *idle* sebelum mentransmisikan paket-paket data. Selain itu, model IAB juga menggunakan koefisien p dengan nilai konstan, sehingga tidak dapat merepresentasikan probabilitas tabrakan antar paket yang sebenarnya, yaitu paket data yang memiliki kemungkinan gagal ditransmisikan dari *node* utama ke *node* penerima. Sedangkan seharusnya koefisien p merupakan variabel dinamis yang dapat berubah seiring dengan kondisi internal suatu *node* atau kondisi eksternal yang dipengaruhi oleh faktor lain. Dengan demikian sesuai yang disajikan pada Gambar 7 bahwa kekurangan IAB tersebut menyebabkan model ini memperoleh kesalahan prediksi yang paling tinggi dibandingkan model lainnya.



Gambar 5. Hasil prediksi setiap model dan ketersediaan bandwidth aktual.



Gambar 6. Rasio kesalahan prediksi.



Gambar 7. Rata-rata kesalahan prediksi model keseluruhan.

Berbeda dengan IAB, berdasarkan Gambar 5 dan Gambar 6 model ABE memiliki rasio kesalahan yang paling kecil dibandingkan model lainnya. Dengan kata lain, ABE memiliki tingkat akurasi yang paling baik pada jaringan nirkabel dengan model *infrastructure*. Hal ini disebabkan karena ABE memperhitungkan waktu *idle* yang tumpang tindih pada medium transmisi yang menghubungkan *node* pengirim dan penerima. Selain itu ABE juga mengasumsikan bahwa setiap pasangan *node* baik pengirim maupun penerima memiliki persepsi terhadap kondisi medium transmisinya masing-masing. Sehingga ketika terdapat *neighbor node* disekitarnya, maka suatu *node* akan selalu memeriksa kondisi medium transmisinya. Pada saat terdapat *neighbor node* yang melakukan transmisi data, maka *node* utama akan merasakan medium berada dalam kondisi *busy*, sehingga *node* tersebut akan menunggu sampai medium transmisi kembali berada pada kondisi *idle* untuk mentransmisikan paket data. Keterlibatan beberapa mekanisme tersebut merupakan faktor penyebab tingginya tingkat akurasi yang dihasilkan oleh ABE.

Jika dilihat pada Gambar 5, DLI-ABE memiliki pola prediksi yang paling acak. Hal ini disebabkan karena kemungkinan tabrakan antar paket dihitung berdasarkan jumlah transmisi *Hello packet* yang diterima tidak selalu sama pada setiap skenario beban trafik. Dengan kata lain *Hello packet* yang diterima oleh *node* penerima tidak selalu berkurang walaupun beban trafik meningkat. Sehingga dapat dikatakan bahwa beban trafik tidak mempengaruhi jumlah *Hello packet* yang diterima oleh *node* penerima. Selain itu sesuai dengan [9], pada penelitian ini skenario pengujian dilakukan sesuai dengan kondisi nyata dimana mekanisme RTS/CTS tidak digunakan (non-aktif) karena dapat menimbulkan *overhead* yang dapat mengurangi ketersediaan *bandwidth*. Sedangkan DLI-ABE melibatkan mekanisme ini untuk mengkalkulasi koefisien *K*. Kemudian faktor lain yang menyebabkan besarnya

TABEL 1
KETERSEDIAAN *BANDWIDTH* AKTUAL DAN HASIL PREDIKSI SETIAP MODEL.

Beban Trafik (Mbps)	Aktual (Mbps)	cPEAB (Mbps)	DLI-ABE (Mbps)	ABE (Mbps)	IAB (Mbps)
1	5,754	6,606	6,765	6,264	6,579
2	5,077	5,650	5,997	5,248	6,427
3	4,172	4,673	6,038	4,261	6,283
4	3,775	4,057	2,711	3,571	6,052
5	3,576	3,153	5,006	2,781	6,046
6	3,431	2,133	5,706	1,835	5,896

tingkat kesalahan dari model ini adalah karena DLI-ABE mengasumsikan bahwa hanya *packet loss* yang disebabkan oleh *collision* (tabrakan antar paket) yang digunakan untuk mengkalkulasi ketersediaan *bandwidth*, sedangkan *packet loss* yang disebabkan oleh faktor lain diabaikan [13]. Berdasarkan pemaparan, maka beberapa faktor tersebut merupakan penyebab tingkat kesalahan yang tinggi dalam memprediksi ketersediaan *bandwidth* di jaringan nirkabel.

Model terakhir yang dianalisis adalah cPEAB. Model ini memiliki pola prediksi yang hampir sama dengan ABE, namun ketika beban trafik mengonsumsi ketersediaan *bandwidth* kurang dari 52%, nilai prediksi yang diperoleh lebih besar dari model ABE dan ketersediaan *bandwidth* itu sendiri. Sedangkan ketika beban trafik mengonsumsi ketersediaan *bandwidth* lebih dari 52%, prediksi yang dihasilkan oleh cPEAB lebih mendekati ketersediaan *bandwidth* aktual. Kondisi ini disebabkan oleh waktu *idle* kanal yang digunakan pada cPEAB hanya melibatkan *node* tunggal, yaitu *node* yang memiliki waktu *idle* terkecil (minimum). Selain itu model ini juga tidak melibatkan atau memperhitungkan transmisi paket data yang sedang dilakukan oleh *neighbor nodes* yang berada di sekitarnya. Kemudian kalkulasi probabilitas tabrakan antar paket dipeoleh hanya dengan melibatkan waktu yang dibutuhkan untuk melakukan mekanisme RTS/CTS dan SIFS, sedangkan pada penelitian ini mekanisme RTS/CTS tidak digunakan. Sesuai dengan konsep *collision* pada cPEAB, maka hal ini menyebabkan probabilitas tabrakan antar paket bernilai 0 sedangkan seharusnya kemungkinan *collision* pasti terjadi. Meskipun cPEAB memiliki pola yang mirip dengan ABE, namun berdasarkan Gambar 7, ABE masih unggul secara keseluruhan dilihat dari tingkat akurasi.

V. KESIMPULAN

Penelitian ini menyajikan hasil investigasi perbandingan kinerja model untuk memprediksi ketersediaan *bandwidth* pada jaringan nirkabel. Proses pengujian dilakukan pada skala simulasi menggunakan perangkat lunak simulasi jaringan *open source* yaitu OMNet++. Model jaringan yang dikembangkan merupakan jaringan nirkabel dengan mode *infrastructure* dengan keberadaan *hidden node* sebagai *node* yang menginterferensi trafik yang sedang berjalan. Kemudian model yang dibandingkan, yaitu DLI-ABE, cPEAB, IAB, dan ABE diimplementasikan untuk memantau kondisi *link* yang menghubungkan antara *node* pengirim dan penerima. Hasil prediksi yang dihasilkan oleh setiap model dibandingkan dengan ketersediaan *bandwidth* aktual untuk menginvestigasi kinerjanya masing-masing. Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan dua parameter pengukuran yang itu akurasi dan rasio kesalahan prediksi.

Berdasarkan hasil eksperimen, teridentifikasi bahwa ketika *hidden node* menghasilkan beban trafik yang mengonsumsi 52% dari kapasitas *bandwidth* maksimum, model ABE dapat mengestimasi atau memprediksi ketersediaan *bandwidth* lebih akurat (tingkat kesalahan terkecil) dibandingkan dengan model prediksi lainnya. Namun, ketika *hidden node* menghasilkan beban trafik yang mengonsumsi lebih dari 52% kapasitas *bandwidth* maksimum, prediksi ABE lebih buruk dibandingkan dengan cPEAB, namun masih lebih akurat dibandingkan dengan dua model lainnya. Selain itu, telah hasil penelitian juga membuktikan bahwa ABE memiliki rasio kesalahan yang paling kecil dengan nilai 14,75% diikuti dengan cPEAB, DLI-ABE, dan IAB dengan perolehan nilai masing-masing sebesar 15,87%, 35,82%, dan 48,8%. Berdasarkan hasil ini, dapat disimpulkan bahwa ABE memiliki hasil prediksi yang hampir mirip dengan kondisi sebenarnya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. E. Frigui, T. Lemlouma, S. Gosselin, B. Radier, R. Le Meur dan J.-M. Bonnin, "Optimization of the Upstream Bandwidth Allocation in Passive Optical Networks Using Internet Users' Behavior Forecast," dalam *International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM)*, Dublin, 2018.
- [2] C. D. Guerrero dan M. A. Labrador, "On the applicability of available *bandwidth* estimation techniques and tools," *Computer Communications*, vol. 33, no. 1, pp. 11-22, 2010.

- [3] A. F. Santamaria dan A. Lupia, "A New Call Admission Control Scheme Based on Pattern Prediction for Mobile Wireless Cellular Networks," dalam *Wireless Telecommunications Symposium (WTS)*, New York, 2015.
- [4] M. R. Araujo, B. R. Silva, J. de Santi, G. B. Figueiredo dan N. L. S. da Fonseca, "A Novel Prediction-Based DWBA Algorithm for NG-EPON based C-RAN Fronthaul," dalam *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2019.
- [5] Z. Yuan, H. Venkataraman dan G. Muntean, "MBE: Model-Based Available Bandwidth Estimation for IEEE 802.11 Data Communications," *Vehicular Technology*, vol. 61, no. 5, pp. 2158-2171, 2012.
- [6] P. Sarigiannidis, M. Louta, G. Papadimitriou, I. Moscholios dan D. Kleftouris, "Alleviating the High Propagation Delays in FiWi Networks: A Prediction-based DBA Scheme for 10G-EPON-WiMAX Systems," dalam *International Workshop on Fiber Optics in Access Network (FOAN)*, Brno, 2015.
- [7] P. Zhao, X. Yang, C. Dong, S. Yang, S. Bhattarai dan W. Yu, "On an Efficient Estimation of Available Bandwidth for IEEE 802.12-Based Wireless Networks," dalam *IEEE Globecom*, 2011.
- [8] A. Rizal dan Susilawati, "Interference Effect of ACL's and SCO's IEEE 802.15 Transmission on IEEE 802.11 Performance," *International Journal of Computer Network and Information Security (IJCNIS)*, pp. 1-7, 2019.
- [9] A. Rizal dan Y. Bandung, "Passive Available Bandwidth Estimation Based on Collision Probability and Node State Synchronization in Wireless Networks," *Journal of ICT Research and Applications*, vol. XI, no. 2, pp. 130-149, 2017.
- [10] J. Hatem, A. R. Dhaini dan S. Elbassuoni, "Deep Learning-based Dynamic Bandwidth Allocation for Future Optical Access Networks," *IEEE Access*, pp. 1-13, 2019.
- [11] Y. Tian, Y. He dan H. Duan, "Passive Localization Through Channel Estimation of On-the-Air LTE Signals," *IEEE Access*, pp. 1-14, 2019.
- [12] M. H. Ali dan M. H. Ali, "H-DBA for Gigabit Passive Optical Network with Performance Analysis," dalam *International Conference on Computer, Electrical & Communication Engineering (ICCECE)*, Kolkata, 2017.
- [13] S. Chaudhari dan R. Biradar, "Collision probability based Available Bandwidth estimation in Mobile Ad Hoc Networks," *Applications of Digital Information and Web Technologies (ICADIWT)*, pp. 244-249, 2014.
- [14] S. Tursunova, K. Inoyatov dan Y.-T. Kim, "Cognitive passive estimation of available bandwidth (cPEAB) in overlapped IEEE 802.11 WiFi WLANs," *Network Operations and Management Symposium (NOMS)*, pp. 448-454, 2010.
- [15] H. Zhao, E. Garcia-Palacios, J. Wei dan a. Y. Xi, "Accurate Available Bandwidth Estimation in IEEE 802.11-based Ad hoc Networks," *Journal of Computer Communications*, vol. 32, no. 6, pp. 1050-1057, 2009.
- [16] C. Sarr, C. Chaudet, G. Chelius dan I. Lassous, "Bandwidth Estimation for IEEE 802.11-Based Ad Hoc Networks," *Mobile Computing, IEEE Transactions*, vol. 7, no. 10, pp. 1228-1241, 2008.
- [17] T. Arsan, "Review of bandwidth estimation tools and application to bandwidth adaptive video streaming," dalam *High Capacity Optical Networks and Enabling Technologies (HONET)*, 2012.
- [18] S. S. Chaudhari dan R. C. Biradar, "Survey of Bandwidth Estimation Techniques in Communication Networks," *Wireless Personal Communications*, vol. 2, no. 83, p. 1425-1476, 2015.
- [19] D. Salcedo, C. D. Guerrero dan R. Martinez, "Available Bandwidth Estimation Tools: Metrics, Approach and Performance," *International Journal of Communication Networks and Information Security (IJCNIS)*, vol. 10, no. 3, pp. 580-587, 2018.
- [20] R. Yasunaga, A. Walid dan P. Ananth, "Modular Dynamic Bandwidth Allocation for a Flexible PON: Concept and Evaluation," dalam *European Conference on Optical Communication (ECOC)*, Gothenburg, 2017.
- [21] D. Salcedo, C. D. Guerrero dan R. Martinez, "Overhead in available bandwidth estimation tools: Evaluation and analysis," *International Journal of Communication Networks and Information Security*, vol. 9, no. 3, pp. 393-404, 2017.
- [22] T. Yang, Y. Jin, Y. Chen dan J. Yudong, "RT-WABest: A novel end-to-end bandwidth estimation tool in IEEE 802.11 wireless network," *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 13, no. 2, pp. 1-11, 2017.
- [23] A. Wei, "IETF Trust's Legal," 14 July 2009. [Online]. Available: <https://tools.ietf.org/pdf/draft-wei-manet-rafsp-00.pdf>. [Diakses 18 July 2017].
- [24] S. S. Chaudhari dan R. C. Biradar, "Survey of Bandwidth Estimation Techniques in Communication Networks," *Wireless Personal Communications*, 2015.
- [25] H. J. Park dan B.-h. Roh, "Accurate Passive Bandwidth Estimation (APBE) in IEEE 802.11 Wireless LANs," *Ubiquitous Information Technologies and Applications (CUTE)*, pp. 1-4, 2010.
- [26] S. Tursunova, K. Inoyatov dan Y.-T. Kim, "Cognitive estimation of the available bandwidth in home/office network considering hidden/exposed terminals," *Consumer Electronics, IEEE Transactions*, vol. 56, no. 1, pp. 97-105, 2010.